

CEPAL/Borrador/TRANS/145
3 de agosto de 1976

BIBLIOTECA NACIONES UNIDAS MEXICO

EVALUACION DE LA INFLUENCIA DE LAS RESTRICCIONES DE PESO MAXIMO
ADMISIBLE POR EJE EN EL CASO DEL TRANSPORTE AUTOMOTOR EN
LA SUBREGION ANDINA

ANEXO DEL INFORME
SERVICIOS DE TRANSPORTE TERRESTRE INTERNACIONAL
EN LA SUBREGION ANDINA

PROYECTO CONJUNTO

NACIONES UNIDAS
CEPAL

CORPORACION ANDINA
DE FOMENTO

1. The first part of the report
is a general introduction to the
subject.

2. The second part of the report
is a detailed description of the
method used in the investigation.

3. The third part of the report
is a discussion of the results of the
investigation.

4. The fourth part of the report
is a conclusion and a list of
references.

INDICE

	<u>Página</u>
INTRODUCCION Y RESUMEN	1
I. ANTECEDENTES	17
1. Pavimentos	17
a) Diseño de pavimentos flexibles	19
b) Diseño de pavimentos rígidos	26
c) Diseño de repavimentos	32
d) Conservación	34
2. Algunas características de los camiones	37
a) Camiones tipos	37
b) Selección de camiones representativos	39
3. Diseños tipos de pavimento y repavimento y solici- taciones que admiten	42
4. Costos de la infraestructura y costos de operación de los camiones	44
II. ANALISIS DE SUSTITUCION DE COSTOS OPTATIVOS ENTRE LOS COSTOS DE LA INFRAESTRUCTURA Y LOS COSTOS DE OPERACION DE LOS VEHICULOS	48
1. Costo total (infraestructura más operación).....	48
a) Costo mínimo en el diseño de asfalto	52
b) Costo en el diseño de hormigón	53
c) Camiones tipos	56
d) Repavimentación	56
2. Costo total en tres diseños de pavimentos asfálticos	57
3. La opción de repavimentar	63
a) Inversión en repavimentación	64
b) Costos en ambas opciones	65
c) Conclusiones	67
4. Discusión metodológica de las conclusiones	67
a) Influencia de la magnitud de la demanda de tránsito	68
b) Criterios de asignación de costos de la infra- estructura a las pasadas de los vehículos	70
c) Representatividad y cobertura de los costos de operación adoptados para los vehículos	72

/d) Variación

	<u>Página</u>
d) Variación de los supuestos en el cálculo de los costos totales de repavimentación	76
e) Influencia de la variación de las taras de los camiones	78
f) Materias sobre las que no existen suficientes antecedentes o investigaciones	81
III. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
1. Restricciones de peso máximo admisible por eje ...	87
2. La opción de repavimentar	88
3. Criterios sobre diseños de pavimentos	88
4. Criterios sobre tipos de camiones	89
5. Alcances al transporte automotor subregional.....	90
6. El caso colombiano	91
7. Recomendaciones	91
Anexo	95

INTRODUCCION Y RESUMEN

Objetivos del estudio

El objetivo principal del estudio es evaluar cuantitativamente el efecto de limitar en los vehículos el peso máximo admisible por eje sobre los costos totales del transporte automotor de los países de la Subregión Andina.^{1/} Asimismo se propone presentar criterios y metodologías que ayuden a los funcionarios y técnicos competentes a adoptar límites que propendan a optimar la función del transporte.

Esta materia ha sido muy controvertida en los últimos años, pues hay corrientes de opinión favorables a fijar límites bajos - con lo que se disminuye el costo de la infraestructura -, en oposición a otras que pretenden disminuir el costo de operación de los vehículos permitiendo mayor peso por eje. El presente informe plantea la minimización del costo total (de la infraestructura más el de operación) del transporte automotor.

Algunos antecedentes históricos

Esas corrientes de opinión se presentan claramente en el transcurso de los años, pues poco tiempo después que en los países industrializados en que surgió el transporte automotor el desarrollo vial avanzó hasta la construcción de una capa de rodadura pavimentada, se observó que el uso la desgastaba o deterioraba. Así, con el propósito de preservar el patrimonio vial, se llevó a cabo una investigación, a cargo de la American Association of State Highway Officials (AASHO) de los Estados Unidos.^{2/} De ésta se concluyó que el peso de los ejes de los vehículos que circulan en las vías desgasta el pavimento (aunque su deterioro puede deberse también a otras causas, especialmente geológicas, de construcción y climáticas). Apoyándose en esa experiencia, la AASHO concluyó que era conveniente disponer medidas para limitar el

^{1/} Bolivia, Colombia, Chile, Ecuador, Perú y Venezuela.

^{2/} Véanse American Association of State Highway Officials, Policy on Maximum Dimensions and Weights of Motor Vehicles to be Operated over Highways of the United States, Washington, D.C., 1963, y Industry Advisory Committee, Recommendations for Commercial Vehicle Sizes and Weights, Washington, D.C. 1962.

peso máximo por eje en los vehículos. Así, en 1946 los límites recomendados fueron de 8.165 y 14.515 toneladas por ejes simple y doble respectivamente, los que tenían bastante coincidencia con los pesos de los ejes que en la época solicitaban las carreteras. El criterio principal en que se apoyaron estas restricciones fue precisamente el desgaste del pavimento, que crece desproporcionadamente con el incremento de la solicitación.^{3/} Asimismo, el límite recomendado para el peso máximo por eje simple se adoptó como referencia en las investigaciones y en los métodos de diseño.

Sin embargo, al transcurrir el tiempo se incrementó la demanda de transporte automotor, en tanto que surgían cargas potenciales que requerían menores costos de transporte. Ante estas circunstancias, la tecnología automotriz reaccionó produciendo camiones más grandes y de mayor peso que satisfacían las condiciones del mercado. La utilización plena de estos camiones - de mayor capacidad y menor costo de operación - se tradujo en aumento de las solicitudes, que superaban el límite de peso por eje, razón por la cual en 1963 la AASHO y la Industry Advisory Committee recomendaron aumentar el límite a 9.072 toneladas por eje simple, manteniendo el límite correspondiente al eje doble. Posteriormente, y por las razones expuestas, se continuó la investigación en esta materia, especialmente en los países desarrollados, y de ella surgieron conclusiones sobre la conveniencia de aumentar más esos límites. Así, en 1972 la Unión Internacional de Transportes por Carretera (IRV) publicó un estudio recomendando que se adoptaran internacionalmente los límites de 13 y 21 toneladas por ejes simple y doble, respectivamente. Además, actualmente, algunos estados norteamericanos han fijado límites mayores para las carreteras estatales, correspondiendo, por ejemplo, el máximo a Maryland que dispuso 10 y 18 toneladas por ejes simple y doble, respectivamente, mientras que varios otros estados (Connecticut, Nueva York y el Distrito de Columbia), Maine,

^{3/} Este concepto se desarrolla en la sección 1 del capítulo I. Asimismo, en el cuadro 4 se anotan valores que lo confirman.

Massachusetts, New Hampshire, New Jersey, New Mexico, fijaron también 10 toneladas para el eje simple pero en el eje doble las respectivas restricciones varían entre 15.3 y 16.2 toneladas; en los estados restantes se han mantenido las restricciones federales (aunque en algunos el peso por eje doble llega a 16.2 toneladas), con la excepción de Hawai cuyos límites son 11.0 toneladas para el eje simple y 14.5 toneladas para el doble. Por otra parte, la American Trucking Association, Inc., ha planteado a las autoridades de su país la conveniencia de aumentar "los límites actualmente arcaicos del peso máximo por eje que rigen en las carreteras federales".

Límites adoptados por los países de la Subregión Andina

La mayoría de los países en vías de desarrollo, tanto por esta misma condición cuanto por su menor experiencia en el transporte vial automotor, adoptaron - sin realizar sus propias investigaciones al respecto - límites de peso máximo por eje más o menos parecidos a los vigentes en los países desarrollados y, por las mismas causas que afectaron a éstos, los han aumentado con el transcurso del tiempo, aunque desfasados. Así, hasta 1973 regían en los países andinos los límites que se anotan en el cuadro 1.

De los valores del cuadro se desprende claramente que en esa época prevalecía el criterio de restringir el peso por eje simple a aproximadamente el nivel recomendado por la AASHO en 1946, pues en cuatro países andinos ese límite fluctuaba entre 8.2 y 9.0 toneladas. Las excepciones eran Perú (véase de nuevo la nota b/ del cuadro 1), que estudiaba un límite mayor para su carretera longitudinal costera (Panamericana), cuyos tramos se terminaban de construir en la época y, Ecuador, que intensificaba la pavimentación en buena parte de sus carreteras. De todo ello se desprende que los países que en esa época disponían ya de una longitud vial significativa, mantenían los límites inicialmente adoptados pues suponían que ello preservaba la capa de rodadura "proyectada para aquel límite, por lo que no resistiría esfuerzos mayores". Con este mismo criterio, en algunos de esos países se instalaban estaciones de control de peso en las

/Cuadro 1

Cuadro 1

SUBREGION ANDINA: LIMITES DE PESO MAXIMO POR EJE, PREVALECIENTES
A DICIEMBRE DE 1973

(Toneladas/eje)

País	Eje simple	Eje doble
Bolivia a/	8.5	14.5
Colombia	8.2	14.5
Chile a/	9.0	15.0
Ecuador	11.0	19.0
Perú b/	11.0	18.0
Venezuela a/	8.5	14.5

Fuente: Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC), Informe final del grupo técnico de trabajo sobre integración física.

- a/ A la fecha en estos tres países se realizaban estudios para aumentar los límites.
- b/ Los valores referidos correspondían en 1973 a un anteproyecto. Asimismo se pretendía que tuvieran validez sólo en la región costera; mientras que en la sierra y la selva se mantenían los de 9 y 14 toneladas por ejes simple y doble respectivamente, los mismos que prevalecían en ese año en todo el país.

carreteras con el propósito de multar o impedir la continuación del viaje a los vehículos que sobrepasaban esos límites. Sin embargo, desde algunos años anteriores a 1973 ya se observaba que la gran mayoría de los camiones cargados sobrepasaba los límites establecidos; que los que no los superaban realizaban el viaje con un bajo factor de carga y, finalmente, que las tarifas aplicadas correspondían a un costo (por tonelada-kilómetro) dependiente de una alta utilización de la capacidad de los camiones, la que implicaba un peso por eje superior al límite fijado.

/De esta

De esta manera se concluyó que la fijación de bajos límites de peso máximo por eje en los camiones, resultaba sólo teórica, y que el control de su cumplimiento era políticamente inaplicable (aunque generalmente se aplica con rigurosidad al tránsito internacional). Asimismo, se estimó que si se adoptaran límites mayores aparte de reconocer una situación de hecho, facilitaría el control de su cumplimiento, lo que a su vez bien podría traducirse en la disminución de las solicitudes totales (respecto de las que ocurrían con límites bajos).

En consecuencia, en algunos países andinos se hicieron investigaciones al respecto, que en Bolivia, Chile y Venezuela mostraron ^{4/} la conveniencia económica y financiera de aumentar el límite de peso máximo admisible por eje a los valores que se anotan en el cuadro 2. Decisiones 94 y 56 de la Comisión del Acuerdo de Cartagena

En diciembre de 1975 la Comisión del Acuerdo de Cartagena adoptó la Decisión 94 - correspondiente a la propuesta 58 - que entre otras materias aprobó los límites de peso máximo admisible de 11 y 16 toneladas por ejes simple y doble, respectivamente, y además limitó el peso total del vehículo a 38 toneladas, todo ello referido exclusivamente al diseño de pavimentos de la red troncal andina.^{5/} En consecuencia, la Decisión 94 no agrega normas para la regulación del peso máximo por eje de los vehículos que circulan en las carreteras de la red troncal, de lo que se desprende que en este aspecto continúa rigiendo lo dispuesto en la Decisión 56.

^{4/} Véanse CONAVIAL, Investigación sobre la conveniencia de aumentar el límite legal de peso por eje de los vehículos de carga en Venezuela, Venezuela, 1975; Antonio Bocalandro, Análisis y recomendaciones sobre políticas restrictivas para los pesos por eje de los camiones en Venezuela, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, 1971; Jaime Baraqui, Iván Navarro y Juan Rutllant, Causas de deterioro en las carpetas de rodado y soluciones generales para 3 800 kilómetros de caminos nacionales pavimentados, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile, 1973; e Ing. Daniel Dake, Estudio de peso de vehículos en carreteras, Servicio Nacional de Caminos, Bolivia.

^{5/} Se limitó también el peso del eje delantero a 6 toneladas.

Cuadro 2
SUBREGIÓN ANDINA: LÍMITES DE PESO MÁXIMO POR EJE
PREVALECIENTES A ENERO DE 1976

(Toneladas/eje)

País	Eje simple	Eje doble
Bolivia	11	14.5
Colombia	8.2	14.5
Chile	12	18 a/
Ecuador	11	19
Perú	11	18
Venezuela b/	13	20

Fuente: Informaciones proporcionadas por funcionarios competentes de los países respectivos y decretos pertinentes.

- a/ Válida para la importación de camiones. Para el parque existente se admiten hasta 20 toneladas.
- b/ A la fecha de preparación del presente informe parecía inminente la promulgación del decreto que fijaría estos límites.

Esta última Decisión, aprobada en agosto de 1972, anota en su artículo 20 que "la circulación de los vehículos se efectuará de conformidad con las disposiciones legales y reglamentarias de los Países Miembros a través de cuyos territorios se realiza, particularmente en lo referente a las especificaciones técnicas, de seguridad, ... Cada país miembro comunicará a los demás las condiciones que exige para dicha circulación, que en ningún caso podrán ser distintas de las exigidas para la circulación de sus propios vehículos".

Entre las conclusiones que se desprenden de los antecedentes presentados en esta sección y en la anterior, cabe destacar sólo dos: la primera es que los países de la Subregión están reaccionando - aunque desfasados en el tiempo - frente a las exigencias que imponen

/los camiones

los camiones modernos, facilitando su libre circulación; y la otra, que si bien la Decisión 94 constituye un avance, resulta también insuficiente al limitar su alcance sólo al diseño, manteniéndose así la variedad de restricciones de los países, lo que dificulta el tránsito internacional.

Orientación de la investigación

Es muy importante tener presente que la red troncal andina ya existe, que gran parte de ella está pavimentada y que el resto se encuentra en proceso de pavimentación. Por lo tanto, lo aprobado en la Decisión 94 sobre el límite de peso máximo por eje para el diseño tiene alcance limitado, persistiendo la dificultad en la circulación de los vehículos que realizan el transporte automotor entre los países de la subregión, cuyas normas respectivas difieren, y, probablemente, también las resistencias de sus pavimentos.

Sin embargo, si se considera la opción de repavimentar las capas de rodadura desgastadas o cuyas resistencias sean insuficientes, la Decisión 94 tendría mayor utilidad, por cuanto si bien fija un límite de peso máximo por eje para el diseño de las capas de rodadura, está implícita en ella la intención de **extenderlo** oportunamente a los vehículos en circulación y, paralelamente, controlar su cumplimiento. Así, la repavimentación de algunas carreteras contribuiría a que esa intención resultara viable a más corto plazo.

Sin embargo, antes de proponer una solución que supuestamente disminuirá los obstáculos que se oponen a la fácil circulación del transporte subregional debe comprobarse que efectivamente ella propenderá a optimar el transporte automotor.

En consecuencia, la presente investigación está encaminada a determinar el límite de peso máximo admisible por eje que reduzca al mínimo el costo total de ese tipo de transporte. Para ello debe considerarse que metodológicamente se presenta una situación - típica de trade-off - 6/ en que la evaluación debe apoyarse en criterios de sustitución de costos optativos entre costos de infraestructura y costos de operación de los vehículos, en que la disminución

6/ Expresión norteamericana que se refiere a la búsqueda de una solución de transacción entre las ventajas y desventajas que se desprenden de la confrontación de opciones. /de uno

de uno implica necesariamente el aumento del otro. Así, por ejemplo, si el límite máximo de peso por eje fijado es elevado, los costos de operación serían bajos, favoreciendo con ello a los usuarios, y los costos de la infraestructura (de inversión inicial y de conservación durante la vida útil del pavimento) serían altos, lo que supone mayores egresos fiscales.

Elementos principales que se consideran en el análisis planteado

Con el propósito de optimar la situación planteada mediante un análisis de opciones de sustitución de costos, se consideran básicamente los siguientes parámetros.

Pavimentos y repavimentos tipos. Se consideran dos pavimentos tipos, uno rígido y otro flexible, de varios espesores optativos, y también dos opciones de repavimentos flexibles, que se superpondrían a los dos anteriores.

Los pavimentos representan el patrimonio existente que se pretende preservar, mientras que los repavimentos constituyen la opción de invertir rentablemente, disminuyendo los costos de operación mediante futuros aumentos del peso máximo por eje.

Vehículos tipos. Se consideran cuatro camiones más o menos representativos del parque subregional, suficientemente adecuados para realizar el transporte internacional en grandes longitudes viales que, a lo menos uno de ellos, pueda cubrir la ruta que une Perú con Bolivia, y otro que pueda transportar contenedores.

Los camiones representan, por un lado, el efecto estructural solicitante de las capas de rodadura, capaz de desgastarlas o deteriorarlas, y por otro, el costo de operación del transporte, que varía según la restricción de peso por eje que rija la circulación de los mismos.

/Cuadro 3.

Cuadro 3

OPCIONES DE RESTRICCIÓN DE PESO MÁXIMO ADMISIBLE POR EJE
PROPUESTOS EN ESTE ESTUDIO

(Toneladas por eje)

	Opciones de restricción		
	I	II	III
Eje simple	8.2	11.0	13.0
Eje doble	14.5	16.0	21.0

Fuente: Cuadro 2.

Opciones de restricción de peso máximo por eje. Se presentan tres opciones de peso máximo admisible por eje que corresponden respectivamente, al límite más bajo que rige en los países andinos, al establecido por la Decisión 94, y al límite más alto pretendido.7/

Factores que califican los resultados del análisis

El desarrollo cuantitativo de la sección anterior se apoya inevitablemente en cifras, criterios y supuestos medios. Así, la validez o el alcance de las conclusiones a que llega depende fundamentalmente de la representatividad de esos promedios. Por ejemplo, el límite óptimo para un país andino en que el costo de construcción sea mayor o el costo de operación sea menor que los respectivos promedios adoptados, o bien en que la tasa preferente de actualización sea superior, se ubicará por debajo del óptimo medio subregional.

7/ Como límites más altos se proponen el de 13 toneladas para el eje simple y el de 21 toneladas (en lugar del de 20 toneladas adoptado por Venezuela) para el eje doble. Ello obedece a dos motivos: uno, que el propósito del estudio es abarcar el máximo de posibilidades, y la combinación de 13 y 21 toneladas en los ejes simple y doble respectivamente constituye la pretensión máxima (expuesta por la Unión Internacional de Transportes por Carretera, ya referida y que apenas supera por una tonelada en el eje doble a la pretensión venezolana); y el otro, que se ha estimado que existe mayor equivalencia del eje simple de 13 toneladas con el eje doble de 21 toneladas, que con el de 20 toneladas. (Véase la sección 4 del capítulo II.)

/Los factores

Los factores que más influyen en los resultados que dé el análisis referido, según los valores que se adopten como representativos o promedios, son los siguientes: estructura de los costos de la infraestructura y de los de operación; infraestructura existente; densidad, características, y composición del tránsito en cuanto a la naturaleza de la carga; tasa social de actualización; distribución de costos y beneficios entre el gobierno y los usuarios; composición del parque y optimación del camión tipo adoptado; programación automotriz; y criterios preferenciales sobre: el diseño de los pavimentos, la validez de las decisiones en el tiempo, y la forma de utilización del camión. A continuación se desarrollan estos conceptos de forma resumida.

Estructura de los costos de la infraestructura y de operación de los vehículos. La conclusión a que se llega en el estudio, apoyada en valores medios de los costos de la infraestructura y de operación, puede aplicarse a los países sólo cuando en éstos los costos mantienen entre sí la misma relación o proporción que en los promedios adoptados.

Si en un país o área determinada, por ejemplo, los costos de construcción fuesen mayores que el valor medio adoptado en el estudio, la restricción de peso máximo por eje que optimiza el costo total tendría que bajar a un límite menor que el que concluye el estudio, por cuanto el costo de la infraestructura pasa a tener mayor importancia cuantitativa que el de operación. Asimismo si este último costo fuese menor que el promedio adoptado, el desplazamiento ocurre en el mismo sentido. A la inversa, si el costo de la infraestructura fuese menor - o bien el costo de operación fuese mayor -, que el promedio adoptado, entonces el óptimo se desplaza hacia un peso máximo por eje mayor que el que concluye el estudio.

Infraestructura existente. Sin lugar a dudas hay diferencias de resistencia entre los pavimentos existentes en los países e, incluso, entre los pavimentos de las diversas carreteras de cada país. Por ello, la conclusión del estudio, aunque se apoya en diversos tipos de diseños, no puede ser válida para todos los países y todas sus carreteras pavimentadas pues, en estricto rigor, la minimización del costo total del transporte automotor depende de cada pavimento específico.

/Densidad, características

Densidad, características y composición del tránsito en cuanto a la naturaleza de la carga. Por razones metodológicas, en el estudio se determina el costo de la infraestructura, basándose en el volumen de tránsito que consume la vida útil de un pavimento. Pues bien, en las distintas carreteras o áreas de los países andinos, en general, y de cada uno de ellos en particular ese volumen puede darse en períodos de tiempo muy distintos entre sí. Asimismo, volúmenes iguales pueden tener componentes de tránsito pesado también muy distintos, por lo que el desgaste de la capa de rodadura puede mostrar diferencias significativas. Por otra parte, influye también la distribución vial del tráfico de carga (según la naturaleza de la misma). Así, por ejemplo, el transporte automotor de productos mineros e industriales pesados, representa una alta solicitud sobre la capa de rodadura que al mismo tiempo, es continua - de "punta a punta" de una determinada ruta vial -, pues se trata de cargas originadas y destinadas puntualmente.^{8/} A la inversa, en vastas zonas agrícolas se generan cargas livianas que se distribuyen en la red caminera rural y se incorporan a la red principal en distintos puntos de ella, por lo que el efecto es desuniforme y representa una solicitud baja en buena parte de la red, con excepción de los tramos de acceso a los grandes centros consumidores.

Se concluye, entonces, que el óptimo a que se llega en este estudio no podría serlo igualmente en zonas tan diferentes como las dos citadas anteriormente, ni tampoco en áreas cuyas densidades de tránsito sean distintas. Asimismo, se concluye que en un mismo país, el óptimo de peso máximo por eje podría estar formado por una gama de valores,^{9/} en que la validez de cada uno de ellos regiría solamente en carreteras o zonas determinadas.

^{8/} Por ejemplo, la carga desde un yacimiento minero hasta un puerto o hasta una planta de tratamiento; o también de productos metálicos desde la planta elaboradora hasta el centro distribuidor o mercado consumidor.

^{9/} Como ocurre en los estados norteamericanos, aspecto ya mencionado.

Composición del parque automotor y optimación del camión tipo adoptado. Además del volumen de tránsito pesado, también influye mucho en la determinación del óptimo, el tipo de los camiones que componen el parque. Así, por ejemplo, dos camiones de idéntico peso bruto, pero que difieran en número y tipo de ejes producirán efectos estructurales muy distintos sobre la capa de rodadura. Sin embargo, por ineludible imposición metodológica, en el presente estudio se obvió esta situación optimando el tipo de camión, pues en caso contrario no se habrían podido optimar las restricciones de peso por eje.

Se concluye, entonces, que en la medida que los respectivos parques de los países andinos se compongan de camiones que reúnan las mismas características que los camiones tipo adoptados en este estudio, les serán aplicables las conclusiones a que se llega sobre el peso máximo por eje que minimiza el costo del transporte automotor.

Programación automotriz. Según ya se señaló, resultó ineludible adoptar camiones tipos que permitieran optimar el costo del transporte.¹⁰ En consecuencia, la programación automotriz que se adopte para la Subregión es también un factor determinante en la fijación del límite de peso máximo admisible por eje, pues influirá en la evolución del parque automotor y, por lo tanto, en la magnitud, tipo y frecuencia de los efectos estructurales en las carreteras andinas.

Esto, a su vez, lleva a concluir que es muy conveniente que los países andinos uniformen sus restricciones pues con ello se simplificaría la programación automotriz, disminuiría el costo de cada unidad, se utilizaría plenamente la capacidad de carga de los camiones y se facilitaría el uso del autotrasbordo (roll-on/roll-off).

^{10/} No obstante la validez de la optimación para los propósitos del estudio, no podría afirmarse en definitiva que los camiones adoptados sean los más adecuados para la Subregión, pues los antecedentes de apoyo resultarían insuficientes para ello.

Tasa social de actualización

Esta tasa que interpreta una preferencia económica y social por el presente respecto del futuro, indudablemente es distinta en cada país. Así, por ejemplo, un país que no disponga de grandes recursos inmediatos para inversión, pero con expectativas de tenerlos a plazo, preferirá destinar sus recursos actuales a proyectos de alta rentabilidad, por lo que su tasa preferencial de actualización debe ser alta, fluctuando por ejemplo entre 15 y 18% anual o más. Este caso parece ser el de Bolivia, y podría ser también el de Chile, mientras que en Venezuela la situación es diferente, pues en la actualidad dispone de cuantiosos recursos de inversión, que le permitirían realizar la mayor parte de los proyectos existentes. Por este motivo, bien puede escoger proyectos con el criterio de imponerles tasas de actualización relativamente bajas que fluctuarían, por ejemplo, entre 6 y 8% anual.

De lo anterior se desprende que la conveniencia tanto de preservar el patrimonio vial - o sea, de extender en el tiempo la inversión realizada - como de repavimentar las carreteras para que admitan solicitudes mayores de peso por eje - o sea, de anticipar en el tiempo la realización de inversiones adicionales - es variable en los países y depende de características económicas prevaletientes en los mismos. Por lo tanto, el óptimo económico del costo de transporte en cada país es función de su propia tasa de actualización. Asimismo, la restricción más adecuada, según el presente estudio, no podría aplicarse libremente a cada país, ni tampoco la conveniencia de repavimentar.

Por ello, el análisis se apoya solamente en una tasa de actualización de 12% anual (estimada como promedio), sin verificar para otros valores de la misma.

Distribución de costos y beneficios entre los usuarios y el gobierno.

En este aspecto también se presenta una situación que en los diferentes países obedece a políticas y criterios distintos.

/La situación

La situación consiste en que una restricción que admita pesos mayores, beneficia a los usuarios, pues disminuye los costos de transporte, mientras que el gobierno debe incurrir en mayores gastos - que frecuentemente no recupera de los usuarios - para construir y conservar pavimentos de mayores resistencias, (que puedan admitir eficientemente solicitaciones estructurales mayores). A la inversa, con restricciones que admitan menor peso por eje, el gobierno hace inversiones de menor significación, mientras que los costos del transporte automotor crecen, afectando al usuario.

En consecuencia, la fijación de una restricción de peso máximo por eje debe considerar la política de desarrollo que al respecto se haya decidido, aspecto que puede tener notables diferencias entre los distintos países andinos.

Criterios preferenciales. En una evaluación como la presente, en cada cuantificación y en la aplicación de cada método analítico, rigen diversos criterios que contienen preferencias implícitas, distintas entre los países, presentándose también situaciones típicas de sustitución de costos optativos. Entre muchas otras, se indican sólo tres: para diseñar un pavimento se presentan numerosas posibilidades de combinación de espesores y de materiales, cada una de las cuales permite obtener pavimentos estructuralmente equivalentes, pero de distinto costo; al evaluar un repavimento, o bien un pavimento de vida útil relativamente larga (de unos 20 a 30 años) se está proyectando hacia el futuro una preferencia actual, quizá marginada de eventuales avances tecnológicos o incapaz de prever cambios económico-sociales de significación; finalmente, el factor de carga de los camiones (que en el estudio se supone de 100% por no existir otra opción metodológica) responde, también, tanto a las condiciones del mercado como a una decisión financiera del empresario transportista, quien puede preferir sobrecargar la capacidad de sus camiones y con ello maximizar sus beneficios a corto plazo e incrementar sus costos de mediano plazo.

/Ponderación de

Ponderación de la influencia de los factores que califican los resultados del análisis. Cada uno de los factores descritos en la sección anterior influye en la determinación del límite óptimo. Sin embargo, su influencia es sólo teórica pues muchos de ellos pueden tener en algunos países una participación cuantitativa baja, incluso despreciable. No obstante, en un estudio como el presente no es posible prever esta circunstancia para cada país y para cada una de sus zonas.

Es importante, entonces, destacar en general, los factores que tienen una influencia mayor, casi decisiva, en la determinación del límite óptimo. Son los costos de operación de los vehículos y los costos de la infraestructura y, obviamente, también la tasa de actualización. Asimismo, es muy importante la magnitud y frecuencia del tránsito pesado en caso que el proceso de optimación se extienda conjuntamente a las restricciones y al diseño de los pavimentos.

El desarrollo del estudio

No obstante las ineludibles limitaciones señaladas en párrafos anteriores, el estudio se desarrolla sobre la base de que sus conclusiones, aportan elementos de juicio suficientemente confiables y calificados para ordenar, conceptualizar y cuantificar los diversos aspectos del problema y también, muy especialmente, para representar cuantitativamente el significado económico de cada una de las tres restricciones escogidas (véase de nuevo el cuadro 3).

Por tal motivo, el estudio se divide en dos partes principales. La primera, sobre antecedentes, se orienta a cuantificar los parámetros que influyen en el costo del transporte: efecto del peso por eje de los camiones sobre pavimentos flexibles y rígidos; características de los camiones; diseños usuales de pavimentos; y costos referidos a la inversión inicial en los pavimentos y repavimentos, a su conservación, y a la operación de los camiones.

En la segunda parte, se hace un análisis de sustitución de costos optativos que envuelve a todos los parámetros referidos, de forma de evaluar los costos implícitos en diversas situaciones típicas,

/en las

en las que se hace variar esos parámetros con el propósito de determinar tentativamente posiciones que se aproximen al óptimo.

Apoyándose en esa evaluación el estudio finaliza presentando conclusiones y recomendaciones. De ellas cabe dar a conocer por anticipado tres conclusiones: una, que los límites de peso máximo admisible adoptados en la Decisión 94, son en general adecuados pero además, los límites (mayores que aquéllos) fijados en Chile y Venezuela se justifican por las condiciones locales de ambos países; otra, que la opción de repavimentar parece ser económicamente conveniente si al mismo tiempo se disponen límites más altos de peso por eje; y, finalmente, que los límites vigentes en Colombia parecen bajos, lo que se traduce en un alto costo del transporte. Así, la principal recomendación que se desprende del estudio se refiere a la enorme importancia que tendría la realización de un estudio de repavimentación y la fijación de límites más altos para el peso máximo admisible por eje en Colombia.^{11/} Es evidente que si la investigación propuesta para ese país mostrara la factibilidad de repavimentar algunas de sus carreteras del Eje Central y de aumentar los límites de peso por eje, se llegaría a disminuir el costo del transporte colombiano y también de parte del subregional.

^{11/} En esta investigación se aplicarían obviamente los datos propios del país.

I. ANTECEDENTES

En la fijación rigurosa de los límites del peso máximo admisible por eje en los vehículos, deben considerarse como parámetros principales las condiciones estructurales de las capas de rodadura y el efecto solicitante del peso por eje de los vehículos. Con el fin de evaluar diversas posibilidades de límites, se adoptan en este capítulo diseños tipos de pavimento y se calculan los costos de la infraestructura y de operación de los camiones.

El efecto solicitante del peso por eje desgasta o deteriora las capas de rodadura regulares, sean pavimentadas, de grava, o simplemente de tierra. Sin embargo, el presente análisis se limita a las capas de rodadura pavimentadas por cuanto concentran la preocupación de los organismos pertinentes, pues se les destina la mayor parte de la inversión.

1. Pavimentos

Antes de realizar el análisis específico de los pavimentos, cabe destacar dos consideraciones conceptuales que suelen inducir a confusión. Ellas son la vida útil y el índice de viabilidad.

La vida útil de un pavimento es un dato de diseño, que se determina sobre la base de estratigrafías de tránsito estimadas para el período de referencia.

El índice de viabilidad surgió - de un ensayo realizado por la American Association of State Highway Officials (AASHO) - como un criterio subjetivo para calificar el estado de un pavimento dado. Según ese criterio se asignaron números a las calificaciones, que en la época de la investigación no representaban elementos cuantificables. De esta manera el N° 5 corresponde a una capa de rodadura "muy buena", siguiéndole en orden descendente, las calificaciones "buena", "aceptable o regular", "mala" y "muy mala".

Cada calificación está asociada a una determinada deformación permanente del pavimento, que fue enjuiciada por un grupo de choferes. Así, una capa de rodadura N° 5 no tiene deformaciones (o si las tiene,

/son insignificantes)

son insignificantes) y, por lo tanto, no entorpecen la circulación de los vehículos; si corresponde al N° 3, sus deformaciones dificultan, pero no impiden, la circulación; y si fuese N° 1, sus pronunciadas deformaciones prácticamente impedirían la libre circulación.

Con posterioridad a la investigación de la AASHO, algunos investigadores correlacionaron el mismo índice con la magnitud de las deformaciones - y de otras variables análogas cuantificables -, concluyendo en una relación matemática que permite determinar el número índice a través de la medición de las deformaciones.^{1/} Con ello se eliminaron los juicios de los conductores, susceptibles de error, pero no se liberó al índice de viabilidad de su carácter subjetivo.

De lo anterior se desprende que existe dependencia entre la vida útil del pavimento y el índice de viabilidad, pues aquella se proyecta de manera que la capa de rodadura mantenga un determinado índice en un período dado, después del cual comienza a bajar. Así, por ejemplo, una carretera podría proyectarse para una vida útil de 20 años con un índice de viabilidad N° 5, que empieza a bajar en la medida que se la utiliza, hasta el término del período de vida útil, en el que desciende (dependiendo de factores climáticos, geológicos, de las sollicitaciones, conservación, técnica constructiva empleada, etc.) a 4, 3, 2 o 1.

^{1/} La relación es: $p = 5.03 - 1.91 \log (1 + \overline{SV}) - 0.01 \sqrt{C + P} - 1.38 \overline{RD}^2$
siendo

p: índice de viabilidad;

\overline{SV} : promedio de la varianza de las mediciones de la inclinación en ambas huellas del pavimento con respecto a la rasante inicial;

C: es el área del pavimento con grietas visibles (medida en pies cuadrados) por cada 1 000 pies cuadrados de superficie de pavimento;

P: es la superficie de parches (en pies cuadrados) por cada 1 000 pies cuadrados de pavimento;

\overline{RD} : es el promedio de la depresión en ambas huellas (en pulgadas).

/La secuencia,

La secuencia, entonces, se inicia en la política de desarrollo del transporte, en la cual se asignan índices de viabilidad a las carreteras en proyecto (que generalmente fluctúan entre los N° 3 y 5 según el financiamiento disponible, el uso esperado para la carretera, y su evaluación económica). Luego, dado el índice de viabilidad, se adopta una determinada vida útil para el pavimento en su diseño (apoyada en la política de inversiones del subsector vial y en la evaluación económica del proyecto).

En consecuencia, el óptimo probablemente se aproxime más a la situación en que un pavimento dado cumpla aproximadamente la vida útil de diseño manteniendo el índice o los índices de viabilidad deseados, que otra en que el diseño del pavimento esté sobredimensionado y prevea una vida útil que se extienda larga o indefinidamente.

Aclarados los conceptos de vida útil para un determinado índice de viabilidad, corresponde evaluar el efecto de las solicitudes - causadas por la circulación de los vehículos - en las capas de rodadura. Para ello es imprescindible revisar los métodos de diseño estructural de pavimentos y luego cuantificar las solicitudes que éstos pueden admitir (según diseños tipos).

El diseño del pavimento se realiza conjuntamente con los de la base y la sub-base pues ambos elementos, entre otras funciones, contribuyen a absorber el efecto solicitante de los vehículos.

Existen diferencias entre los métodos de diseño de pavimentos flexibles y rígidos, por lo que se analizan separadamente.

a) Diseño de pavimentos flexibles

Entre los numerosos métodos de diseño de pavimentos flexibles ^{2/} que existen se ha escogido el de Liddle que se apoya en el ensayo vial de la AASHO, en parte por este motivo, y también porque es moderno y bastante riguroso.

^{2/} Entre otros destacan los de Highway Research Board, Federal Aeronautics Administration, Burmister, Ivanoff y Hyeem.

El método considera tres variables principales: la sollicitación total del tránsito durante todo el periodo de vida útil propuesto, que se cuantifica a través del concepto de eje equivalente; el clima, que se evalúa según el promedio mensual de un periodo anual, distinguiéndose meses secos, húmedos, helados y de deshielo; y el suelo, cuya capacidad de soporte se determina a través del Índice de penetración California (California Bearing Ratio) (CBR). Finalmente, se cuantifica la acción que ejercen sobre el pavimento los tres factores referidos, a través de un número estructural.

i) Clima y suelo. Estas dos variables reflejan características locales, son invariables para un pavimento dado, y no revisten mayor trascendencia para los fines de este estudio. Su influencia en el diseño del pavimento se cuantifica mediante simples relaciones matemáticas. 3/

3/ El clima se cuantifica a través del factor regional R, dado por

$$R = \frac{V_1 \cdot n_1 + V_2 \cdot n_2 + V_3 \cdot n_3 + V_4 \cdot n_4}{N}$$

Los V_i son los valores que muestran el efecto del clima en los suelos, distinguiéndose: suelo helado (V_1), que fluctúa entre 0.2 y 1.0; suelo seco (V_2), entre 0.3 y 1.5; suelo húmedo (V_3), entre 1.5 y 4.0; y suelo en deshielo (V_4), entre 4 y 5. Los n_i representan el periodo correspondiente a cada estado climático, o sea, son los factores que ponderan el clima a través del tiempo, y N es la suma de los n_i . (Véase en el anexo el ejercicio 1.)

Por otra parte, el soporte del suelo (S) está dado por la relación $S = 4.4 \log_{10} CBR + 1.2$, siendo CBR el Índice de penetración California. (Se define como CBR=100 el correspondiente al chancado perfecto.) En los demás tipos de suelo se mide la penetración de un pistón determinado, la que se compara con la penetración correspondiente al chancado perfecto, y cuya proporción es el CBR asignable al suelo en cuestión (todos menores que 100).

ii) Sollicitación

ii) Solicitud del tránsito y su incidencia en el diseño del pavimento. Se conoce como eje equivalente, un eje simple de 18 000 libras (18 kips u 8.15 toneladas) cuyo efecto de desgaste - o destructivo - de una pasada sobre una superficie de rodadura se ha cuantificado con bastante aproximación. Se lo define como eje de referencia, al cual se reducen linealmente todos los demás ejes. Si un eje más liviano necesitara, por ejemplo, pasar tres veces para causar el mismo desgaste que el eje de referencia, la equivalencia de este eje es de 0.33 ejes equivalentes de 18 kips. También se establece la equivalencia para ejes más pesados; así por ejemplo, si el efecto de desgaste de un eje en una sola pasada fuese 150% mayor que el del eje de referencia de 18 kips, su equivalencia sería de 2.5 ejes equivalentes de 18 kips.

La tabla del cuadro 4 permite referir cualquier solicitud conocida, proveniente de ejes simples o dobles, a ejes equivalentes de 18 000 libras.^{4/} Asimismo, con esas equivalencias y datos de tránsito es posible calcular la totalidad de ejes equivalentes que solicitará un pavimento durante su vida útil.^{5/}

En todo el desarrollo posterior del presente estudio, se calcula el desgaste del pavimento por efecto de la circulación de los vehículos a través del concepto de ejes equivalentes. Por ello, es importante destacar e insistir en que, si bien el eje equivalente es función del tránsito, la correspondencia no es directamente proporcional sino dependiente de la magnitud del peso por eje (aspecto ya destacado en el cuadro 4), la que a su vez se relaciona con el tipo de camión. Así, por ejemplo, a dos camiones cargados que tengan el mismo peso bruto, corresponderán distintos ejes equivalentes si tienen distinto número de ejes físicos, o bien si en uno son dobles y en el otro simples. El cuadro 5 contiene un ejercicio teórico para un tránsito diario de 100 camiones, para los cuales se consideran cuatro tipos optativos.^{6/}

^{4/} Véase en el anexo el ejercicio 2.

^{5/} Véase en el anexo el ejercicio 3.

^{6/} Véase también la "productividad" de los camiones en el cuadro 9.

Cuadro 4

COEFICIENTES DE EQUIVALENCIA ENTRE UNA PASADA (DE DIVERSAS SOLICITACIONES) Y UNA PASADA DE EJE DE REFERENCIA DE 18 KIPS

Solicitud del eje (toneladas)	Coeficiente de equivalencia
a) <u>Ejes simples</u>	
2	0.002
4	0.05
6	0.27
8	0.95
8.15	1.0
9	1.6
10	2.65
11	4.0
12	6.0
13	8.5
14	12.0
15	16.0
16	21.0
17	27.0
b) <u>Ejes dobles (tándem)</u>	
2	0.002
6	0.02
10	0.17
14	0.7
16	1.1
17	1.7
18	2.2
19	2.8
20	3.5
21	4.5
22	5.3
23	6.2
24	7.9
25	10.0

Fuentes: Sergio Miquel, Caminos, Universidad de Chile, Departamento de Obras Civiles, 1973; Dusan Dujisin, Mecánica de suelos en la ingeniería vial, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Chile, 1972.

Cuadro 5

EJES EQUIVALENTES DIARIOS CORRESPONDIENTES A 100 PASADAS DIARIAS DE CAMIONES, PARA CUATRO OPCIONES DE VEHICULOS TIPOS

Tipo de camión (número y tipo de ejes)	Peso bruto del camión cargado (toneladas)	Ejes equivalentes diarios
Articulado, 3 ejes simples	32	1 730
Articulado, 2 ejes simples y uno doble	33	5 400
Articulado, 1 eje simple y dos dobles	34	1 600
Trailer (acoplado) 4 ejes simples	30	3 200

Fuente: Estimaciones y cuadro 4.

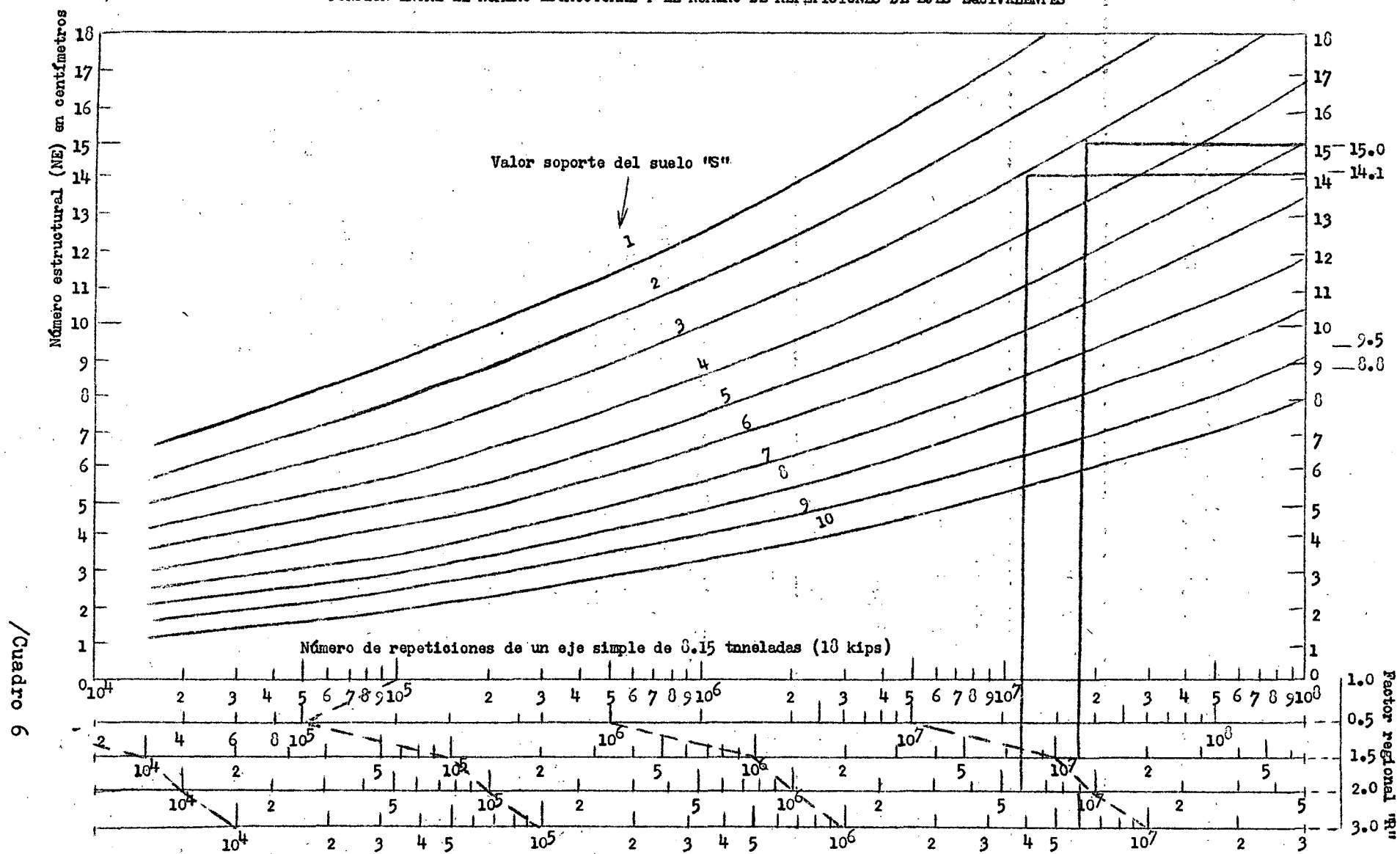
iii) Número estructural. Corresponde a las acciones y reacciones estructurales de los elementos: sollicitación del eje, efecto climático, y soporte del suelo, y se les cuantifica mediante un número (que representa el espesor ponderado del pavimento más los de la base y la sub-base).

El número estructural se relaciona con los tres parámetros citados, a través de relaciones matemáticas, pero como su cálculo es engorroso se han representado gráficamente.^{7/} (Véase el gráfico 1.) Conocido el número estructural (NE), el dimensionamiento del pavimento queda dado por la relación: $NE = a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + a_3 \cdot b_3$, en que a_i son los factores de ponderación (conocidos) de los respectivos espesores de las capas b_i . Así, b_1 es el espesor de la capa de rodadura pavimentada, b_2 el de la base, y b_3 el de la sub-base (en el futuro podrían agregarse otras capas b_4 , b_5 , etc.).

^{7/} Véase en el anexo el ejercicio 4.

Gráfico 1

FUNCION ENTRE EL NUMERO ESTRUCTURAL Y EL NUMERO DE REPETICIONES DE EJES EQUIVALENTES



Fuente: Mecánica de suelos en la ingeniería vial, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, 1972.

Cuadro 6

VALORES DE LOS FACTORES DE PONDERACION DE LOS ESPESORES
DE LAS CAPAS DE RODADURA

Tipo de capa de rodadura	Valor de a_i
Hormigón asfáltico	0.44
Mezcla arena-asfalto	0.40
Mezcla grava-asfalto	0.25
Mezcla en sitio	0.20
Base estabilizada de chancado (gravilla)	0.14
Base grava-arena	0.11
Base tratada con cemento	0.15 a 0.30
Sub-base de arena	0.05 a 0.10

Fuente: Caminos y Mecánica de suelos en la ingeniería vial, op. cit.

iv) Diseño. Con los datos aquí proporcionados, el diseño del pavimento flexible se limita a un simple cálculo, mientras que la selección de materiales se basa sobre la disponibilidad local y consideraciones de costos, presentándose a veces varias opciones.^{8/}

Un pavimento diseñado de acuerdo con esta metodología, construido mediante técnicas adecuadas y rigurosas, y utilizando materiales calificados - o sea, en que los índices de ponderación aplicados representen efectivamente la resistencia real de ellos -, debe tener teóricamente un índice de viabilidad N° 5 durante la mayor parte de su vida útil de diseño. Asimismo, en la medida que los materiales tengan una calificación menor - o bien la construcción sea inadecuada -, el índice desciende rápidamente a 4, 3, o menos e, incluso, en este caso el índice inicial puede ser inferior a 5. Después de cumplida la vida útil de un pavimento que hubiese tenido inicialmente un índice 5, éste bajará hipotéticamente a 4 o 3 y si se sigue utilizando continuará descendiendo paulatinamente.

^{8/} Véase en el anexo el ejercicio 5.

b) Diseño de pavimentos rígidos

La sollicitación ejercida por los ejes de los vehículos se traduce también en desgaste (o deterioro) de los pavimentos rígidos. Sin embargo, debido precisamente a su rigidez, el comportamiento estructural de este tipo de pavimento es diferente al flexible y, en consecuencia, también es diferente el método de su diseño.

Las variables que influyen en la capacidad de absorción de cargas que tiene este pavimento son: la sollicitación, la capacidad de soporte del suelo, y la resistencia de diseño del hormigón.

El soporte del suelo, ya mencionado en la sección anterior, se expresa en este método por el módulo de reacción de la subrasante y también se determina mediante experimentación y ensayos de laboratorio. Los valores más comunes fluctúan entre 1.5 a 15 kilogramos por centímetro cúbico pero, generalmente, para aumentar esta capacidad de soporte del suelo se agrega una base granular entre el pavimento y el suelo.^{2/}

La sollicitación que ejercen los ejes se traduce en un esfuerzo de flexotracción en el pavimento, creándole una determinada fatiga.

Así, el esfuerzo de flexotracción depende, en primer lugar, de la acción sollicitante, medida en toneladas; luego, de la capacidad de soporte del suelo, ya mencionada; y finalmente, del espesor del pavimento (pues su comportamiento estructural es análogo al de una viga apoyada sometida a esfuerzos de flexión y tracción). De aquí se concluye que el método de dimensionamiento de pavimentos rígidos es necesariamente iterativo - pues la acción sollicitante varía con el espesor del pavimento que se pretende determinar -, y para lograr un diseño de resistencia adecuada es necesario realizar tanteos sucesivos.

^{2/} En este caso el soporte (del suelo más de la base) es:
 $K_c = K + 0.027 (1.2 e + e^2/12)$ siendo e = el espesor de la base (en centímetros); K el módulo de reacción (o sea el soporte) del suelo (en kg/cm^2), antecedentes que proporciona el laboratorio sobre la base de ensayos del respectivo suelo; y K_c la capacidad de soporte que tendrá el pavimento apoyado en la base y ésta en el suelo (véase en el anexo el ejercicio 6).

/El esfuerzo

El esfuerzo de flexotracción se determina mediante ecuaciones que lo relacionan con el espesor del pavimento y el soporte del suelo. Sin embargo, dado que la resolución de las ecuaciones mencionadas es engorrosa, ellas se han resuelto gráficamente. (Véanse los gráficos 2 y 3.)^{10/}

El esfuerzo de flexotracción calculado debe ser absorbido por la resistencia de diseño del hormigón. Esta tercera variable, la resistencia del hormigón, depende fundamentalmente de la dosificación que se le aplique.^{11/}

La acción resultante del esfuerzo de flexotracción sobre la resistencia del pavimento, se mide por el cuociente entre ambos, y se la denomina razón de fatigas. Así, si las tensiones de 21.5, 25.8 y 31.8 kg/cm², calculadas en el ejercicio 7, se pretendieran absorber con un pavimento cuya resistencia fuese de 45 kg/cm², las razones de fatigas serían de 0.48; 0.57 y 0.71, respectivamente.

Cada razón de fatigas - o cuociente entre la acción (esfuerzo de flexotracción) y la resistencia al esfuerzo -, está asociada a un número de repeticiones de la sollicitación. El total de repeticiones que admite cada razón de fatigas es igual al módulo de rotura del hormigón y, por lo tanto, es capaz de provocar la falla - o rotura - del pavimento. La relación correspondiente se presenta graficada a escala logarítmica en el gráfico 4, mientras que en el cuadro 7 se anotan algunos valores obtenidos de la función graficada. (Véase el gráfico 4.)

^{10/} Véase en el anexo el ejercicio 7.

^{11/} Está dada por la relación $R_d = 1.1 R_m (1 - 0.84c)$, en la que R_d es la resistencia de diseño a 90 días, R_m la resistencia media a 28 días, ambas en kg/cm², y c el coeficiente de variación del conjunto de resultados de ensayos, y que depende de la uniformidad en la preparación del concreto. Así, adquiere los valores:

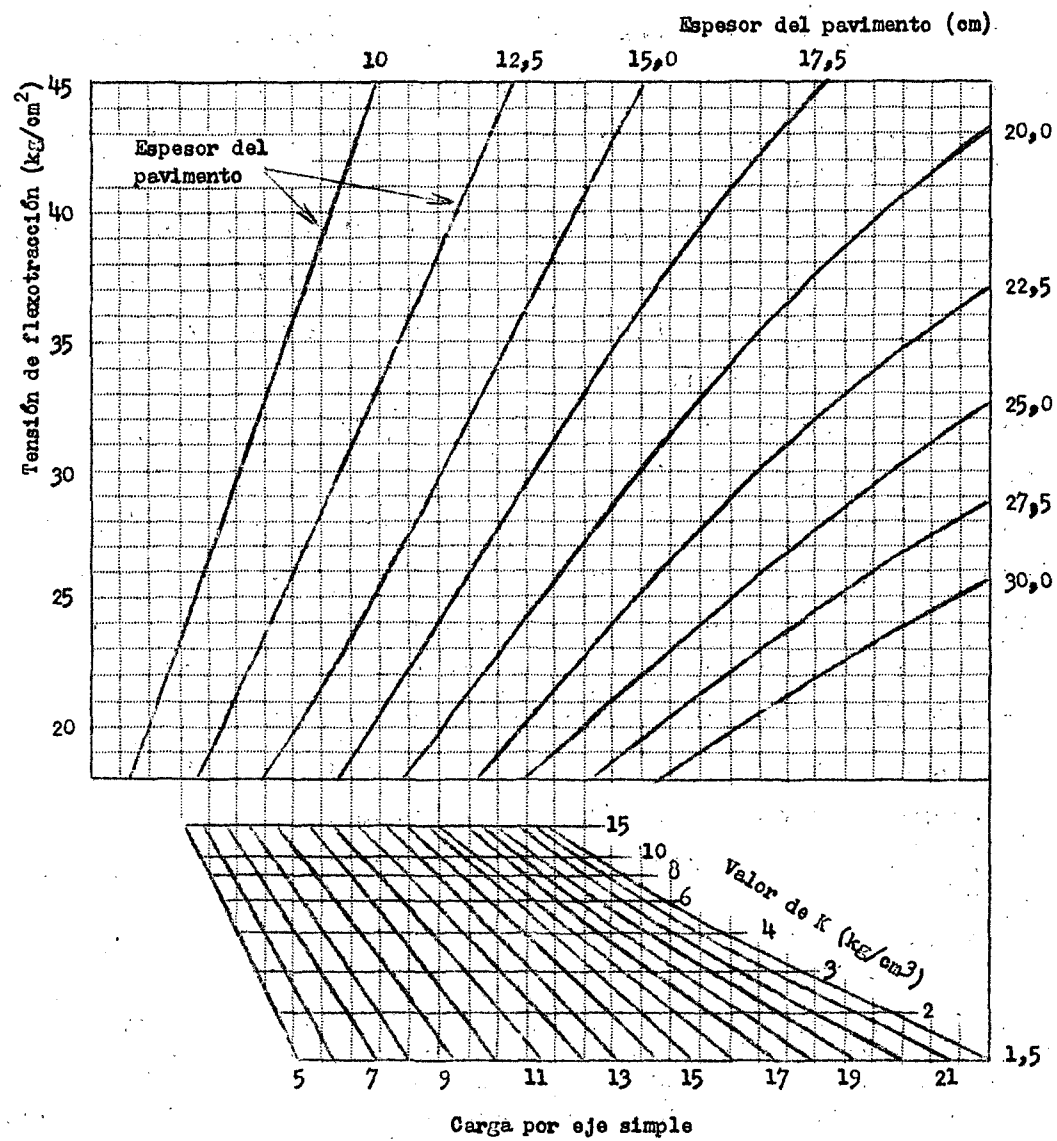
- $c = 0.1$ en confección excelente;
- $c = 0.11$ a 0.15 en confección buena;
- $c = 0.16$ a 0.20 en confección regular;
- $c = 0.20$ en confección mala.

Los valores usuales de la resistencia de diseño (a 90 días) fluctúan entre 35 y 45 kg/cm².

/Gráfico 2

Gráfico 2

ADACO DE INFLUENCIA PARA CARGA EN JUNTURA TRANSVERSAL

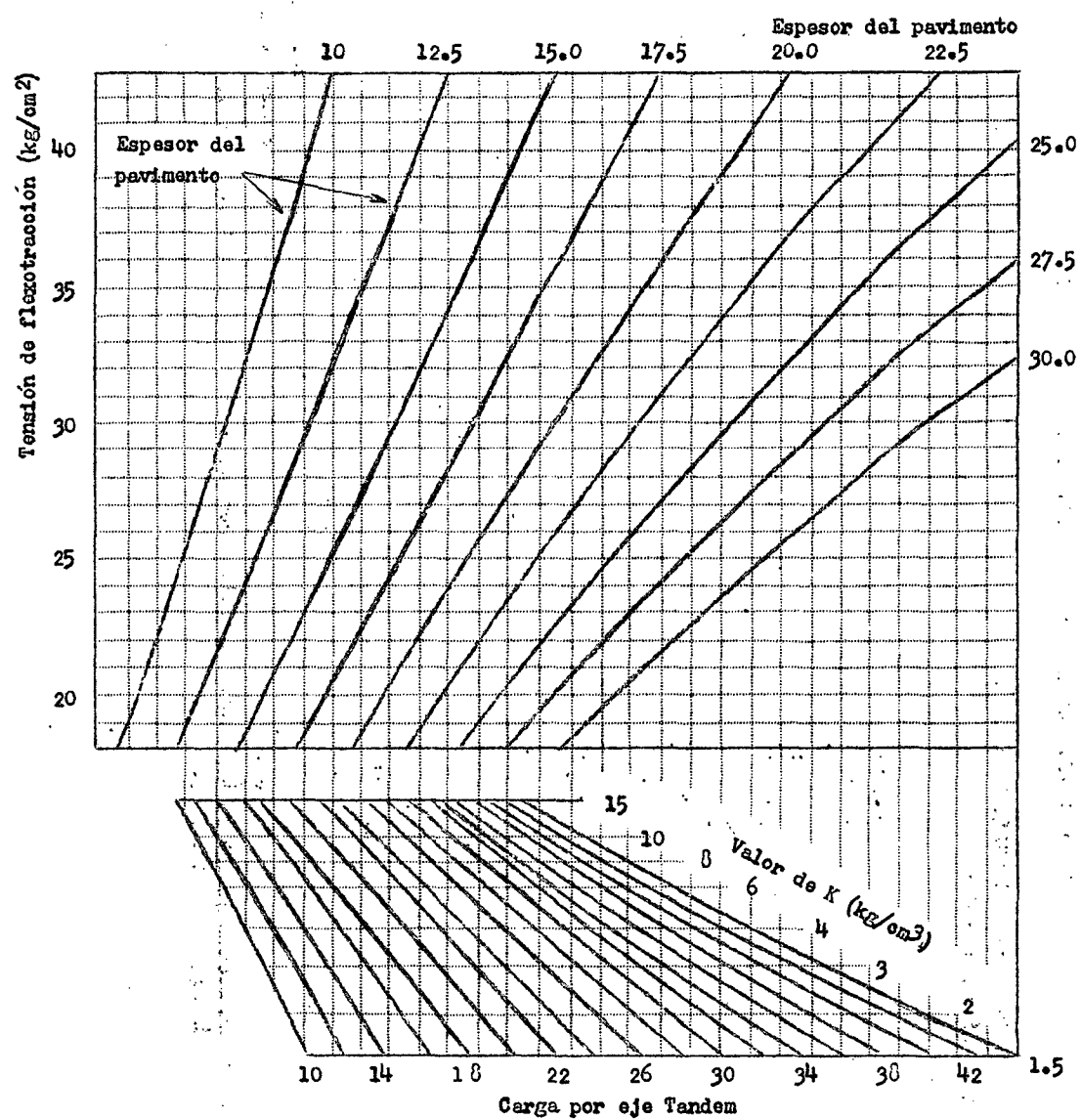


Fuente: Mecánica de suelos en la ingeniería vial, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile, 1972.

/Gráfico 3

Gráfico 3

ABACO DE INFLUENCIA DE PICKETT-RAY PARA CARGA EN JUNTURA TRANSVERSAL



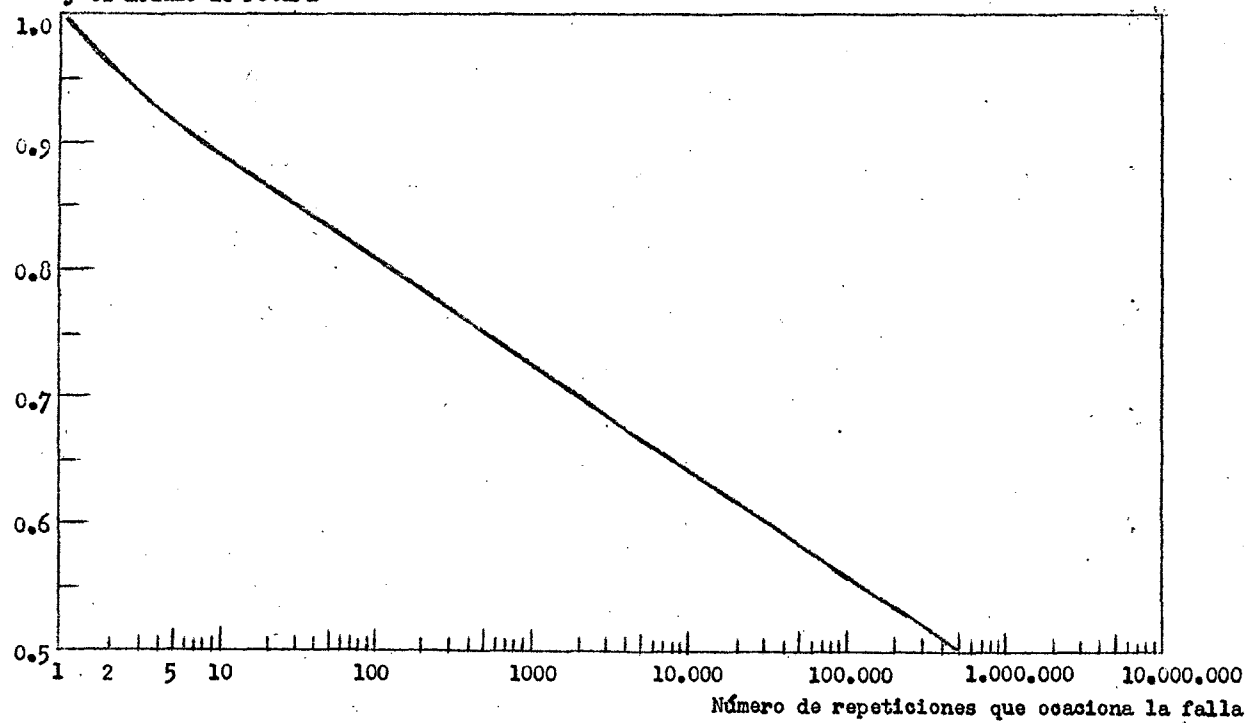
Fuente: Mecánica de suelos en la ingeniería vial, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas de Chile, 1972.

/Gráfico 4

Gráfico 4

CURVA DE FATIGA DEL HORMIGON SOMETIDO A TENSION DE FLEXION

Relación entre la tensión de trabajo
y el módulo de rotura



Fuente: Mecánica de suelos en la ingeniería vial, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras
Públicas de Chile, 1972.

Cuadro 7

RELACION ENTRE NUMERO DE REPETICIONES Y RAZONES DE
FATIGAS EN PAVIMENTOS DE HORMIGON

Razón de fatigas	Número de repeticiones admisibles
Menos de 0.50	Ilimitadas
0.50	550 000
0.51	400 000
0.52	300 000
0.53	240 000
0.54	180 000
0.56	100 000
0.58	57 000
0.60	32 000
0.65	8 000
0.70	2 000
0.75	490
0.80	120
0.85	30
0.90	8
1.00	1

Fuente: Caminos, op. cit.

En el cuadro 7 se observa muy claramente que a cada razón de fatigas corresponde un determinado número de repeticiones admisibles (del esfuerzo asociado a cada razón de fatiga). En la práctica, el número de repeticiones reales suele ser distinto al de las repeticiones admisibles, y el cuociente entre ambas repeticiones se llama fatiga consumida. Por ejemplo, si el número de repeticiones de un determinado eje es inferior al de las repeticiones que admite el pavimento, la fatiga consumida está dada por el cuociente entre ambos, y el pavimento llega a su rotura cuando la suma de fatigas consumidas resulta igual a su resistencia, o sea - dado que el método expuesto se apoya en razones de fatigas -, cuando la suma de fatigas

/consumidas es

consumidas es igual a la unidad.^{12/} Asimismo, si el número de repeticiones reales es superior al de las repeticiones admisibles, o sea, si el cuociente entre ambos - y consecuentemente también la fatiga consumida - es mayor que 1, el pavimento no resiste la sollicitación propuesta, debiéndose estudiar otro diseño más resistente.

Así, con el método descrito es posible determinar el número de pasadas correspondientes a sollicitaciones conocidas que puede soportar un pavimento durante su vida útil de diseño,^{13/} o bien, diseñar un pavimento para una sollicitación dada.^{14/}

c) Diseño de repavimentos

A raíz de algunos experimentos realizados recientemente, sobre todo en países desarrollados, existe optimismo respecto de la viabilidad de repavimentar capas de rodaduras, sea porque estén desgastadas o bien para permitirles que absorban eficientemente mayores pesos por eje.

La repavimentación más usual experimentada consiste en aplicar una capa asfáltica sobre hormigón asfáltico y sobre hormigón de cemento.^{15/} Sin embargo, aunque no se conocen los resultados con suficiente precisión, lo realizado hasta ahora permite mantener bastante optimismo al respecto.

^{12/} Supóngase por ejemplo, un peso dado por eje que se repite 40 000 veces durante la vida útil del pavimento y que cada pasada produce una razón de fatigas de 0.58. Este pavimento admite 57 000 repeticiones (véase el cuadro 7), por lo que la fatiga consumida es de $40\ 000/57\ 000 = 0.70$, o sea, el 70%. Luego, el excedente de fatiga - no consumida - es de 30% que queda disponible para absorber las demás sollicitaciones.

^{13/} Véase en el anexo el ejercicio 8.

^{14/} Véase en el anexo el ejercicio 9.

^{15/} La viabilidad del repavimento de hormigón sobre hormigón aparentemente no ha sido investigada ni experimentada suficientemente, por lo que se excluye de este informe (pues el propósito es presentar a los países de la Subregión opciones suficientemente probadas, lo que se logra con el repavimento de asfalto).

De los países de la Subregión, Venezuela y Chile han iniciado recientemente la repavimentación de algunos tramos,^{16/} mientras que en Colombia se realizan estudios al respecto.

De acuerdo con los progresos logrados hasta la fecha, la repavimentación es técnicamente factible en la mayor parte de las carreteras, constituyendo una excepción los tramos que presentan roturas y deformaciones significativas provocadas por fallas en el cimiento, o bien en la base o sub-base. Si la falla es de las bases o del suelo, pero se ha detectado y resulta superable, la alternativa es construir de nuevo en el mismo lugar, pero si ella es insuperable, se elegirá otro lugar que no presente fallas. La técnica de la repavimentación consiste en superponer sobre el pavimento desgastado una capa adicional de asfalto (cuyas especificaciones y técnicas de construcción garantizan suficiente adherencia).

Según los métodos de diseño conocidos, el repavimento asfáltico tiene un comportamiento estructural idéntico al pavimento asfáltico y, por lo tanto, el método de diseño es también idéntico. Se supone, así, que la capa de asfalto del repavimento es una capa más que cumplirá la función de capa de rodadura, pasando la capa original de asfalto o de hormigón a cumplir funciones de base.

Por otra parte, al diseñar un repavimento debe tenerse presente que la capacidad de resistencia de la capa de rodadura original ha disminuido en función de las solicitaciones absorbidas y de la conservación recibida, y el número estructural parcial del pavimento debe evaluarse sobre la base de ensayos de laboratorio. (Entre otros deterioros, disminuye también el espesor medio por efecto de las huellas en el pavimento, salvo que su conservación haya sido muy rigurosa.)

^{16/} Véanse CONAVIAL, Plan nacional de transporte. Infraestructura física, tomo II, 1973, Venezuela; y Causas de deterioro en las carpetas de rodado y soluciones generales para 3 800 kilómetros de caminos nacionales pavimentados, op. cit.

Pese a que la resistencia y el espesor del pavimento han disminuido respecto de sus valores originales, el repavimento tiene gran capacidad de absorción de solicitaciones, y a un costo relativamente bajo pues aprovecha el pavimento original como base - cuyo soporte es bastante mayor que el de los materiales que usualmente se emplean en la base -, y la base y sub-base como si fueran dos sub-bases. El costo de inversión se limita solamente a la capa de asfalto.^{17/}

d) Conservación.^{18/}

La función principal de la conservación es mantener las carreteras en condiciones adecuadas para la buena circulación de los vehículos. Con este fin, las acciones se orientan a reparar los deterioros producidos en el pavimento por la acción de agentes naturales y por efectos estructurales.^{19/} Así, el propósito de la conservación regular no es prolongar indefinidamente la vida útil del pavimento - aunque podría lograrlo si las solicitaciones fueran muy bajas y el clima muy favorable -, sino mantenerlo en buenas condiciones durante la vida útil del proyecto.

En consecuencia, la vida útil del pavimento asignada en el diseño lleva implícita la conservación del mismo. Además, si ésta no es adecuada, existe el riesgo que el servicio que ofrece un pavimento descienda a un bajo nivel de viabilidad antes de cumplir la vida útil proyectada.

^{17/} Véase en el anexo el ejercicio 10.

^{18/} Véase, Secretaría de Integración Económica de Centroamérica (SIECA), Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras, alcantarillados y puentes, 1974.

^{19/} Entre otros, los siguientes: deformación del perfil, baches, agrietamientos, ondulaciones, hundimientos, huellas, combadura, levantamiento y trizadura de la capa de rodadura, en pavimentos asfálticos; desgaste de juntas, agrietamientos y baches, en pavimentos de hormigón; y erosiones (cortes, terraplenes, taludes, bermas y cunetas), derrumbes, deterioro de base y sub-base, acciones de heladas y lluvias, y obstrucción de obras de saneamiento, en ambos pavimentos.

Las funciones específicas de la conservación de las capas de rodadura 20/ son principalmente las siguientes:

i) Capa de rodadura asfáltica. Las operaciones principales que se realizan para reparar este pavimento son de bacheo y sellado. La primera se aplica de forma localizada para corregir fallas o roturas por agrietamiento (siempre que el ancho de la grieta tenga más de 3 milímetros), que son las más comunes. También se realizan operaciones más o menos parecidas al bacheo cuando se corrigen las fallas producidas por efecto de las huellas, ondulación, combadura, hundimiento y levantamiento. En todos estos casos la reparación se efectúa mediante la extracción del material en la superficie fallada (agrandándola a fin de cubrir todo el sector afectado); la limpieza del hueco, la colocación de una capa de liga o imprimación (asfalto líquido en proporción de 0.25 a 1.0 litro por metro cuadrado), y la colocación de una mezcla de hormigón asfáltico preparada en planta. Obviamente la frecuencia de estas reparaciones es muy variable; sin embargo, según las estadísticas sería adecuado un bacheo anual del 0.5% de la superficie pavimentada.

El sellado se realiza en la superficie del pavimento y generalmente cubre tramos de longitud más o menos significativa. Su propósito principal es evitar la rugosidad de la superficie de rodadura, rellenar grietas pequeñas (de no más de 3 milímetros de ancho) y huellas. Para estas operaciones se usa asfalto líquido (en proporción de 1 a 2 litros de asfalto) o bien este mismo material con agregado de arena. La frecuencia de estas operaciones es también muy variable; sin embargo, es usual que se realicen cada tres a cinco años, dependiendo de la intensidad y sollicitación del tránsito y de las condiciones climáticas.

20/ Además, la conservación se extiende a las bermas (reposición del estabilizado y limpieza de malezas) y a las obras de drenaje (manteniéndolas en buenas condiciones de funcionamiento).

De las operaciones de conservación descritas se concluye que éstas, en general, no agregan gran resistencia al pavimento asfáltico inicial. Sin embargo, el bacheo equivale a un nuevo pavimento que tiene la misma capacidad para absorber cargas que un hormigón asfáltico. Por su parte, el sellado - que no es un repavimento porque la capa que se aplica es muy delgada y el material empleado tiene una resistencia inferior al concreto asfáltico mezclado en planta -, también incrementa la capacidad de absorción de carga, aunque en forma poco significativa.

Por las razones expuestas, más pragmáticas que teóricas, se concluye que en general el sellado difiere del repavimento aunque la frontera entre ambos no está rigurosamente definida. Por ello, en las ocasiones en que se pretende mejorar un pavimento deteriorado, la selección de uno u otro se hace después de analizar las ventajas y desventajas económicas de cada operación.

ii) Capa de rodadura de hormigón. En este tipo de pavimento se realizan principalmente operaciones de bacheo y reposición de juntas. La primera es análoga a la descrita anteriormente, pero con una frecuencia del 0.1% anual. La reposición de juntas consiste en reponer el material asfáltico de las juntas del pavimento de hormigón o bien removerlo completamente, según se haya desgastado solamente o perdido sus condiciones de elasticidad, respectivamente. La frecuencia media estimada para la reposición total es cada tres años y, en el relleno, de una operación anual.

2. Algunas características de los camiones

La sollicitación que ejerce el peso por eje de los camiones sobre la capa de rodadura, depende - además del peso bruto del vehículo que está circulando -, del número, tipo y disposición de los ejes. En consecuencia, en esta sección se analizarán las características principales de la mayoría de los camiones tipos en cuanto a la distribución del peso total en los ejes y luego se escogerán algunos camiones representativos del parque automotor subregional.











Antes de comenzar el análisis, se definen tres tipos de ejes. El eje delantero, que como su nombre lo indica, está debajo del motor del vehículo y tiene dos llantas en total; el eje simple, que consta de un solo eje físico con dos llantas en cada extremo, o sea, tiene cuatro llantas en total; y el eje doble - o tandem -, que consta de dos ejes físicos colocados relativamente cerca (cuya distancia entre centros no excede 2.44 metros) ^{21/} y que cada uno de ellos tiene dos llantas en cada extremo, o sea, ocho llantas en total. También se define la tara, que es el peso del camión descargado y el peso bruto que es el peso total correspondiente al camión cargado.

a) Camiones tipos

En el cuadro 8 se presentan 10 tipos de camiones, dándose para cada uno de ellos un dibujo del perfil (o silueta). Los pesos brutos de estos camiones varían según las restricciones vigentes sobre el peso máximo por eje. Por otra parte, en el cuadro 3 de la Introducción se dieron tres opciones de restricción. La restricción I, que fija 8.2 y 14.5 toneladas por ejes simple y doble, respectivamente, y corresponde al país cuyos límites son los más bajos de la subregión; la restricción II, que admite 11 y 16 toneladas respectivamente, límites que corresponden a los acordados en la Decisión 94; y la

^{21/} Si la distancia entre los centros de los ejes es mayor que 2.44 metros, cada uno de ellos se considera como eje simple. (Esta distancia límite se determinó a través de estudios del efecto estructural sobre la capa de rodadura.)

Cuadro 8
 ALGUNAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS CAMIONES SEGUN LAS TRES OPCIONES DE RESTRICCIÓN PROPUESTAS
 (Toneladas)

Número de ejes	Camiones tipos (perfil)	Denominación	Peso bruto máximo por eje y total			Tara y peso bruto					
			I. Eje simple: 8.2 II. Eje doble: 14.5	III. Eje simple: 11 Eje doble: 16	III. Eje simple: 13 Eje doble: 21	Tara	Peso bruto	Tara	Peso bruto	Tara	Peso bruto
2		A	5.5+8.2 = 13.7	6+11 = 17	6+13 = 19	5.5	13.7	6.5	17	7.3	19
3		B	5.5+14.5 = 20.0	6+16 = 22	6+21 = 27	7.5	20	8	22	9	27
3		C	5.5+8.2+8.2 = 21.9	6+11+11 = 28	6+13+13 = 32	8	21.9	9	28	10	32
4		D	5.5+8.2+14.5 = 28.2	6+11+16 = 33	6+13+21 = 40	9.5	28.2	10.5	33	11.5	40
		E	5.5+8.2+8.2+8.2 = 30.1	5+11+11+11 = 38	6+13+13+13 = 45	10	30.1	10.5	38	12	45
5		F	5.5+14.5+8.2+8.2 = 36.4	6+16+11+11 = 44	6+21+13+13 = 53	11.5	36.4	12	44	12.5	53
		G	5.5+14.5+14.5 = 34.5	6+16+16 = 38	6+21+21 = 48	11.5	34.5	12	38	12.5	48
6		H	5.5+14.5+8.2+14.5 = 42.7	6+16+11+16 = 49	6+21+13+21 = 61	12.5	42.7	13	49	13.5	61
4		J	5.5+8.2+8.2+8.2 = 30.1	5+11+11+11 = 38	6+13+13+13 = 45	9.5	30.1	10.5	38	12.5	45
5		K	5.5+14.5+8.2+8.2 = 36.4	6+16+11+11 = 44	6+21+13+13 = 53	11	36.4	12.5	44	14.5	53

Fuente: Estimaciones e IRU, Weights and Sizes, op.cit.

/restricción III,

restricción III, que da como límites 13 y 21 toneladas, que corresponden a los más altos pretendidos en estudios y proyectos. Para cada una de esas restricciones el cuadro 8 indica el peso por eje, - comenzando por el eje delantero -, el peso bruto correspondiente y la tara.^{22/}

b) Selección de camiones representativos

Para seleccionar un subgrupo de camiones entre los 10 presentados es necesario considerar varios criterios, todos los cuales deberán partir de la base que se trata de elegir camiones aptos para el transporte automotor subregional. Esto significa, por ejemplo, que el subgrupo debe incluir un camión que, siendo relativamente grande y pesado, pueda utilizarse en la carretera que actualmente une Perú con Bolivia; otro que pueda transportar contenedores; uno que sea articulado - obviamente también apto para contenedores, en lo posible de 40 pies - y, finalmente, otro que tenga acoplado. Además, los camiones que se seleccionen deberán tener niveles de productividad, eficiencia y maniobrabilidad adecuados.

En el cuadro 9 se presentan las características de los 10 camiones tipos (referidas en todos los casos a las tres opciones de restricción de peso por eje anteriormente anotadas). Ellas son: peso bruto, capacidad, aprovechamiento (porcentaje del peso bruto que queda libre para ser destinado a la carga), ejes equivalentes consumidos, y productividad del consumo de pavimento (cuociente entre la capacidad y los ejes equivalentes consumidos). En cuanto a las características de los contenedores cabe tener presente que según recomendación de la ISO todos los contenedores deben tener 8 pies (2.438 metros) tanto de ancho como de alto, mientras que su largo puede ser de 10, 20, 30 y 40 pies, y sus pesos totales (con el máximo de carga), de 10.16, 20.32, 25.40 y 30.48 toneladas métricas, respectivamente.^{23/}

^{22/} La tara de un mismo camión puede tener leves variaciones, según el uso que se pretenda dar al vehículo.

^{23/} Según Jane's Freight Containers, 1973-1974.

Cuadro 9

DATOS DE LOS CAMIONES PARA SELECCIONAR UN SUBGRUPO REPRESENTATIVO

Camión	Pesos brutos (PB)			Capacidades (C) a/			Aprovechamiento (%) b/			Ejes equivalentes consumidos (EE) c/			Productividad d/		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
A	13.7	17.0	19.0	8.2	10.5	11.7	60	62	62	1.2	4.3	8.8	6.8	2.4	1.3
B	20.0	22.0	27.0	12.5	14.0	18.0	63	64	67	0.9	1.4	4.5	13.9	10.0	4.0
C	21.9	28.0	32.0	13.9	19.0	22.0	63	68	69	2.2	8.3	17.3	6.3	2.3	1.3
D	28.2	33.0	40.0	18.7	22.5	28.5	66	68	71	1.9	5.4	13.3	9.8	4.2	2.1
E	30.1	38.0	45.0	20.1	27.4	33.0	67	72	73	3.2	12.1	25.8	6.3	2.3	1.3
F	36.4	44.0	53.0	24.9	32.0	40.5	68	73	76	2.9	9.4	21.8	8.6	3.4	1.9
G	34.5	38.0	48.0	23.0	26.0	35.5	67	68	74	1.6	2.5	9.3	14.4	10.4	3.8
H	42.7	49.0	61.0	30.2	36.0	47.5	71	73	78	2.6	6.5	17.8	11.6	5.5	2.7
J	30.1	38.0	45.0	20.6	27.4	32.5	68	72	72	3.2	12.1	25.8	6.4	2.3	1.3
K	36.4	44.0	53.0	25.4	31.5	38.5	70	72	73	2.9	9.4	21.8	8.8	3.4	1.8

Fuentes: Cuadros 4 y 8.

a/ Es la diferencia entre el peso bruto y la tara.

b/ Es el % que representa la capacidad en el peso bruto.

c/ El cálculo se apoyó en que las solicitudes de 5.5, 6.0, 8.2, 11.0 y 13.0 toneladas por eje simple y de 14.5, 16.0 y 21.0 toneladas por eje doble consumen 0.2, 0.3, 1.0, 4.0, 8.5, 0.7, 1.1 y 4.5 ejes equivalentes respectivamente. (Véanse los cuadros 4 y 8.)

d/ Es el cociente entre la capacidad (en toneladas) y el número de ejes equivalentes consumidos.

/Basándose en

Basándose en los antecedentes del cuadro 9 se seleccionaron los camiones tipos A, B, G, y J, por las siguientes razones:

El camión A, es el camión de mayor capacidad que podría cubrir el servicio automotor entre Perú y Bolivia; es el de menor capacidad que podría cubrir rutas internacionales, y es el que más abunda en el parque automotor subregional.

El camión B, es el camión de una pieza (sin articulaciones ni acoplado) de mayor capacidad; su productividad es elevada; permite un buen margen de aprovechamiento (relativamente grande dentro del subgrupo de camiones de baja capacidad); tiene un eje doble (mientras que el camión A se apoya en ejes simples solamente), y eventualmente puede transportar contenedores pequeños.

El camión G, es el único de los seis camiones articulados que es apto para transportar grandes contenedores. Los camiones C y D no pueden hacerlo por sus escasas dimensiones y capacidad; el camión E tiene muy baja productividad, los camiones F y H resultan sobredimensionados y demasiado pesados pues sobrepasan el límite de peso máximo del camión de la opción de restricción II, y en esta misma restricción tienen bajas productividades. Sin embargo, cabe destacar que la limitación del peso máximo a 38 toneladas de la opción de restricción II impide, en definitiva, el transporte del contenedor máximo (con un factor de carga del 100%). Así, el camión G puede transportar el contenedor de 40 pies según la opción de restricción III, el de 30 pies según la opción II, y el de 20 pies según la opción I.

El camión J es el más liviano de las dos opciones de camión con acoplado, y se debe incluir para que el subgrupo sea representativo.

3. Diseños tipos de pavimento y repavimento y solicitudes que admiten

Para continuar el análisis de manera ordenada es necesario adoptar algunos diseños tipos dada la gran diversidad de posibilidades que se presenta al respecto. Así, se adoptaron como diseños tipos los que son más usuales en la Red Troncal Andina. Asimismo, dado que los países de la Subregión tienen la opción de repavimentar, lo que les permitiría eventualmente minimizar los costos económicos del transporte automotor, se adoptaron también dos diseños tipos de repavimento.

Los diseños tipos adoptados son los siguientes:

- i) Pavimento de hormigón asfáltico: 8 centímetros de hormigón asfáltico, 20 centímetros de base de chancado y 30 centímetros de sub-base de arena. Se supone un factor regional R de 2.0 y un soporte del suelo S de 6, valor medio especialmente válido para las zonas costeras de la Subregión.
- ii) Pavimento de hormigón de cemento hidráulico: 18 centímetros de hormigón y 20 centímetros de base granular. Se supone un factor $K = 2.5$ y una resistencia del hormigón de 45 kg/cm^2 .
- iii) Repavimento de asfalto sobre el diseño de asfalto referido en i): 8 centímetros de espesor (se supone que el primer pavimento cumplió su vida útil).
- iv) Repavimento de asfalto sobre el diseño de cemento referido en ii): 5 centímetros de espesor (también se supone que el primer pavimento cumplió su vida útil).

Sobre la base de los métodos de diseño descritos se determinó la cantidad de solicitudes que admite cada diseño tipo, durante su vida útil, de cada camión escogido en la sección anterior, haciendo referencia a cada una de las tres opciones de restricción de peso máximo por eje. Así, fue posible determinar para cada diseño y según cada opción de restricción, el número de pasadas que admite de cada camión tipo y, también, la carga total que puede transportarse durante la vida útil del pavimento. Los resultados se anotan en el cuadro 10

/Cuadro 10

Cuadro 10

NUMERO DE PASADAS Y CARGA DE CADA CAMION TIPO QUE CONSUMEN LA VIDA UTIL DE PAVIMENTOS TIPOS

Camión tipo	Restricción I				Restricción II				Restricción III			
	Pasadas	Carga	Promedios		Pasadas	Carga	Promedios		Pasadas	Carga	Promedios	
	totales	total	diarios		totales	total	diarios		totales	total	diarios	
	(millones)	(millones de toneladas)	Pasadas	Toneladas (miles)	(millones)	(millones de toneladas)	Pasadas	Toneladas (miles)	(millones)	(millones de toneladas)	Pasadas	Toneladas (miles)
a) <u>Diseño de pavimento de hormigón asfáltico</u>												
A	3.33	27.3	457	3.7	8.93	9.8	127	1.3	0.45	5.3	62	0.7
B	4.44	55.5	609	7.6	2.86	40.0	392	5.5	0.89	16.0	122	2.2
G	2.50	57.5	342	7.9	1.60	41.6	219	5.7	0.43	15.3	59	2.1
J	1.25	25.8	171	3.5	0.33	9.2	45	1.3	0.16	5.2	22	0.7
b) <u>Diseño de pavimento de hormigón de cemento hidráulico</u>												
					(Miles)				(Miles)			
A	a/	a/	a/	a/	300	3.2	27	284	34	0.4	3	35
B	a/	a/	a/	a/	550	7.7	50	700	76	1.4	7	352
G	a/	a/	a/	a/	275	7.2	25	650	38	1.3	3	114
J	a/	a/	a/	a/	100	2.8	9	252	11	0.4	1	11
c) <u>Diseño de repavimento asfáltico (sobre asfalto o sobre cemento)</u>												
					(Millones)				(Millones)			
A	10.8	88.6	1 479	12.1	3.0	31.5	411	4.3	1.5	17.6	205	2.4
B	14.4	180.0	1 973	24.7	9.3	130.2	1 274	17.8	2.9	52.2	397	7.1
G	8.1	186.3	1 110	25.5	5.2	135.2	712	18.5	1.4	49.7	192	6.8
J	4.1	84.5	562	11.6	1.1	30.8	151	4.2	0.5	16.3	68	2.2

Fuentes: Estimaciones, cuadro 9 y punto b) de la sección 2 del presente capítulo.

Nota: Los promedios diarios se calculan para vidas útiles de 20 años en el pavimento y repavimento de asfalto y de 30 años en el pavimento de hormigón.

a/ El diseño escogido está sobredimensionado para estas solicitaciones, por lo que teóricamente admitiría ilimitadas pasadas de estos camiones según la restricción en referencia.

(omitiéndose las operaciones para llegar a ellos, que son idénticas a las desarrolladas en los diversos ejercicios presentados en este informe), en el cual se indica solamente un diseño de repavimento, pues ambos diseños escogidos son estructuralmente equivalentes,^{24/} y, finalmente, se agregan promedios diarios de pasadas y de carga con el solo propósito de mostrar valores comparables a los que usualmente se refieren las estadísticas de tránsito.

Los valores del cuadro son muy útiles para las evaluaciones que se presentan más adelante pero no permiten obtener conclusiones sobre las conveniencias relativas de optar por determinados diseños, camiones o restricciones, pues para ello faltarían consideraciones económicas.

4. Costos de la infraestructura y costos de operación de los camiones

Algunos costos del transporte automotor se vinculan entre sí y dependen de los parámetros que influyen en ellos. En esta sección se calculan los costos correspondientes a los diseños tipos de pavimentos y repavimentos y a los camiones tipos seleccionados.

Sin embargo, la determinación de costos representativos para la Subregión es tarea muy compleja, entre otras razones, por la insuficiencia de información, por las diferencias de valores que presentan los distintos países y por la desigual incidencia que ha tenido en ellos la crisis de la energía.

^{24/} Cada uno de los dos repavimentos de hormigón asfáltico, uno de 8 cm de espesor sobre el diseño a) de asfalto y el otro de 5 cm de espesor sobre el diseño b) de cemento, admite 13 millones de ejes equivalentes.

Por otra parte, es preciso destacar que en ambos casos se aplicaron criterios muy conservadores: pérdida del 25% del espesor del primer pavimento, en los sectores afectados por huellas, y pérdida del 40% de la resistencia (o sea de a_i) en el hormigón asfáltico inicial. (En la sección 4 del capítulo II se aplican criterios menos conservadores.)

No obstante estas dificultades se anotan en los cuadros 11 y 12 valores medios ponderados 25/ de los costos directos (o variables) de operación de los vehículos (que incluyen los siguientes componentes: combustibles y lubricantes, llantas, conservación y depreciación 26/), de los costos de inversión en la infraestructura (que incluyen solamente los correspondientes al pavimento, la base, y la sub-base), y de los costos de conservación vial. Todos los costos excluyen impuestos y se refieren a valores de 1973, no afectados por la crisis de la energía.

- 25/ Estos valores se basan en una extensa bibliografía, en la que destacan los siguientes estudios:
- Bolivia: Bolivia Transport Survey, 1968, Gobierno de Bolivia/ PNUD/BIRF; y diversos estudios inéditos del Servicio Nacional de Caminos;
 - Centroamérica: Evaluación del impacto de la crisis de energía en el transporte automotor (CEPAL/MEX/74/17/Rev.2), como referencia para verificar órdenes de magnitud.
 - Colombia: Estudio de transporte en el área del Río Magdalena, Ministerio de Obras Públicas, 1974; y Estudio de costos de transporte automotor, 1974, documento inédito de la Oficina de Planeación del Ministerio de Obras Públicas;
 - Chile: Economía del transporte caminero, marítimo y aéreo, 1968, E. Basso y J. Baraqui; y Causas de deterioro de las carpetas de rodado y soluciones generales para 3 800 km de caminos nacionales, 1973, ambos del Ministerio de Obras Públicas;
 - Ecuador: Estudio de factibilidad del Proyecto Loja-Catococha-Macará, 1972, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones;
 - Perú: Vías de acceso e internas al Callejón de Huailas, 1971, y Consolidación de la planificación en transporte, 1974, ambos del Ministerio de Transporte y Comunicaciones;
 - Venezuela: Plan nacional de transporte, 1968; Diagnóstico del sector transporte, 1973; y Costos de operación de los vehículos automotores de carga en Venezuela, 1971, todos de CONAVIAL.
- 26/ La utilización de solamente estos cuatro componentes se explica en la sección 4 del capítulo II.

Cuadro 11

COSTOS DIRECTOS (O VARIABLES) DE OPERACION DE VEHICULOS TIPOS
EN CARRETERAS PAVIMENTADAS, SIN IMPUESTOS, Y CON
PENDIENTES INFERIORES A 3%, 1973

(Dólares/1 000 kilómetros)

Tipo de camión	Opciones de restricción		
	I	II	III
	6.2 ton/eje simple 14.5 ton/eje doble	11. ton/eje simple 16 ton/eje doble	13 ton/eje simple 21 ton/eje doble
A	61	70	76
B	85	87	106
G	145	150	188
J	132	160	166

Fuentes: Bibliografía referida en la nota 25/ y cuadros 8, 9 y 10.

Nota: Véanse las características de los camiones en el cuadro 8.

Cuadro 12

COSTOS DE INVERSION INICIAL Y DE CONSERVACION VIAL EN DISEÑOS
TIPOS PARA CALZADA DE 7 METROS DE ANCHO, 1973

Rubro	Costo (Miles de dólares por km)
Pavimento de hormigón asfáltico (diseño i))	27.0
Repavimento (diseños iii) y iv))	25.0
Pavimento de hormigón de cemento hidráulico (diseño ii))	57.0
Conservación en el diseño i)	1.25 a/
Conservación en los diseños iii) y iv)	1.3 a/
Conservación en el diseño ii).	0.5 a/

Fuente: Bibliografía referida en la nota 25/.

Nota: Véanse las características de los diseños en la sección anterior.

a/ Miles de dólares al año por kilómetro.

/De los

De los valores presentados en los cuadros 11 y 12 surgen tres observaciones. La primera se relaciona con la época a que se refieren, o sea, antes de 1974, año en que se concretó la incidencia de la crisis de la energía en el transporte. La explicación es que toda la información disponible se refiere a esa época, y no es posible actualizarla a menos que se disponga de la información pertinente para cada país, pues las políticas que ellos adoptaron fueron divergentes (ya que la Subregión está formada por países que exportan petróleo, países que casi se autoabastecen de este combustible y países que lo importan). Sin embargo, este hecho no limita de manera importante las conclusiones a que se llega dado que se mantiene cierto equilibrio entre ambos componentes del costo del transporte automotor, o sea, la operación por un lado, y la infraestructura por otro. De acuerdo con una investigación realizada en Centroamérica ^{27/} aquel equilibrio permite obtener conclusiones suficientemente válidas sobre la optimización de restricciones.

Otra observación atañe a la adopción de un costo anual de conservación, en circunstancias que en el capítulo I, sección 1, d) se anotó que las frecuencias de las operaciones pertinentes son de 3 o más años. Se ha preferido el promedio anual por ser más representativo de un kilómetro medio (ya que esas operaciones no se realizan simultáneamente en toda una carretera dada, sino por tramos cada año).

La tercera observación es que el costo del repavimento sea sólo levemente inferior al del pavimento, aunque en aquel caso se evita teóricamente la construcción de la base y la sub-base. Ello se debe a que en la mayoría de los casos es necesario reconstruir la base y la sub-base de algunos sectores o tramos; preparar la superficie de rodadura del pavimento (desgastado y deformado); y ejecutar el repavimento en una carretera que está en uso, lo que se traduce en un trabajo lento y dificultoso. (En todo caso, el criterio aplicado es conservador).

^{27/} Véase Centroamérica: Evaluación del impacto de la crisis de energía en el transporte automotor, *op. cit.*

II. ANALISIS DE SUSTITUCION DE COSTOS OPTATIVOS ENTRE LOS COSTOS DE LA INFRAESTRUCTURA Y LOS COSTOS DE OPERACION DE LOS VEHICULOS

En el capítulo precedente se cuantificaron los parámetros que influyen en el costo total del transporte automotor, adoptándose pavimentos y camiones tipos.

En este capítulo se evalúan las tres restricciones propuestas de peso máximo por eje en los camiones con el propósito de optimar el costo del transporte, objetivo principal de este estudio. Para ello se calculan los costos correspondientes a cada camión y pavimento tipo.

La evaluación de las restricciones se basa en los efectos económicos que ellas mismas producen pues, por ejemplo, una restricción que admita un bajo límite de peso máximo por eje implicaría costos bajos para la infraestructura y altos para la operación del camión (ambos por tonelada-kilómetro), mientras que si el límite fuera alto serían mayores los costos de la infraestructura y menores los de operación. Así, entre ambos extremos se plantean las opciones de aumentar - o disminuir - unos u otros sustitutivamente en la búsqueda del óptimo.

En el análisis se determina el costo total del transporte automotor, considerando las restricciones, y los camiones y diseños de pavimentos tipo propuestos, lo que permite comparar aisladamente en cada diseño - con diversos espesores optativos - las tres restricciones y, en cada una de ellas, los camiones tipos; y, finalmente, se estudia la conveniencia de la opción de repavimentar.

1. Costo total (infraestructura más operación)

En el cuadro 13 se anotan las inversiones totales en infraestructura (inversión inicial más conservación anual) actualizadas a la fecha de iniciación del pavimento mediante la tasa de actualización (ya referida en la Introducción del 12% anual, y en el cuadro 14 se dan

/los costos

los costos totales del transporte automotor (operación más infraestructura) referidos a valores anuales y unitarios correspondientes a las tres restricciones, los cuatro camiones tipos y a los diseños de nuevos pavimentos y de repavimentos.

Cuadro 13

COSTOS DE LA INFRAESTRUCTURA
(Miles de dólares por km)

Diseño tipo del pavimento	Inversión inicial	Costo anual de conservación	Factor de actualización ^{a/}	Costo actualizado de conservación	Inversión total
Asfalto	27.0	1.25	7.749	10.1	36.7
Hormigón	57.0	0.50	8.055	4.0	61.0
Repavimento de asfalto sobre asfalto	25.0	1.30	7.749	10.1	35.1

Fuente: Cuadro 12.

a/ Para la tasa de actualización del 12% anual.

En los cálculos de los costos totales correspondientes a la capa de rodadura asfáltica (véase de nuevo el cuadro 14) se adoptó como base el volumen de carga máxima que puede transportar cada camión tipo durante 20 años ^{1/} según la restricción I.

En las otras dos restricciones, se aplica también la misma carga, como demanda básica para determinar costos comparables entre sí. De otra manera, la determinación de los costos no habría sido equitativa en las demás restricciones, ^{2/} pues en ellas las demandas

^{1/} Es usual proyectar pavimentos de asfalto y de hormigón con vidas útiles de 20 y 30 años, respectivamente.

^{2/} Al respecto véase el capítulo II, sección 4.

Cuadro 14

COSTOS TOTALES DEL TRANSPORTE AUTOMOTOR (OPERACION MAS INFRAESTRUCTURA)

Camión tipo	Carga total admisible (millones de toneladas)	Carga anual (millones de toneladas)	Costo de operación (centavos de dólar/ton-km)	Vida útil del pavimento (años)	Costo anual de la infraestructura		Costo de la infraestructura (centavos de dólar/ton-km)	Costo total unitario (centavos de dólar/ton-km)	
					Factor de recuperación del capital (f.r.c.) para 12% anual	Valor (miles de dólares por km)			
A. <u>Diseño: Pavimentos de asfalto de 8 centímetros de espesor</u>									
<u>Opción de restricción I</u>									
A	27.3	1.4	0.74	20	0.134	4.9	0.35	1.09	
B	55.5	2.8	0.68	20	0.134	4.9	0.18	0.86	
G	57.5	2.9	0.63	20	0.134	4.9	0.17	0.80	
J	25.8	1.3	0.64	20	0.134	4.9	0.38	1.02	
<u>Opción de restricción II</u>									
A	9.8	1.4	0.67	7.0	0.219	8.0	0.57	1.24	
B	40.0	2.8	0.62	14.3	0.148	5.4	0.19	0.81	
G	41.6	2.9	0.58	14.3	0.148	5.4	0.19	0.77	
J	9.2	1.3	0.57	7.1	0.217	8.0	0.62	1.19	
<u>Opción de restricción III</u>									
A	5.3	1.4	0.65	3.8	0.346	12.7	0.91	1.56	
B	16.0	2.8	0.59	5.7	0.253	9.3	0.33	0.92	
G	15.3	2.9	0.53	5.3	0.267	9.8	0.34	0.87	
J	5.2	1.3	0.51	4.0	0.329	12.1	0.93	1.44	
B. <u>Diseño: Pavimento de hormigón de 18 centímetros de espesor</u>									
<u>Opción de restricción I. El diseño está sobredimensionado respecto de las solicitudes esperadas</u>									
<u>Opción de restricción II</u>									
A	3.2	106.7a/	0.67	30	0.124	7.564	7.09	7.76	
B	7.7	256.7a/	0.62	30	0.124	7.564	2.95	3.57	
G	7.2	240.0a/	0.58	30	0.124	7.564	3.15	3.73	
J	2.8	93.3a/	0.57	30	0.124	7.564	8.11	8.68	
<u>Opción de restricción III. El diseño está por debajo de los requisitos estructurales que exigen las solicitudes esperadas</u>									
C. <u>Costos comparados del pavimento de asfalto de 8 cm de espesor (diseño A) y un pavimento de hormigón de 18.9 cm de espesor, ambos referidos a la opción de restricción II</u>									
Camión tipo	Carga anual (millones de toneladas)	Pavimento de asfalto				Pavimento de hormigón			
		Costos (centavos de dólar/ton-km)			Vida útil (años)	Costos (centavos de dólar/ton-km)			Vida útil (años)
		Operación	Infraestructura	Total		Operación	Infraestructura	Total	
A	1.4	0.67	0.57	1.24	7.0	0.67	0.54	1.21	50
B	2.8	0.62	0.19	0.81	14.3	0.62	0.27	1.08	50
G	2.9	0.58	0.19	0.77	14.3	0.58	0.26	0.84	50
J	1.3	0.57	0.62	1.19	7.1	0.57	0.58	1.15	50

/Cuadro 14 (conclusión)

Cuadro 14 (conclusión)

Camión tipo	Carga total admisible (millones de toneladas)	Carga anual (millones de toneladas)	Costo de operación (centavos de dólar/ton-km)	Vida útil del pavimento (años)	Costo anual de la infraestructura		Costo de la infraestructura (centavos de dólar/ton-km)	Costo total unitario (centavos de dólar/ton-km)
					Factor de recuperación del capital (f.r.c.) para 12% anual	Valor (miles de dólares por km)		
<u>D. Diseño: Repavimento de asfalto de 8 centímetros de espesor (sobre un pavimento inicial de asfalto de 8 centímetros) b/</u>								
<u>Opción de restricción I</u>								
A	88.6	4.4	0.74	20	0.134	4.7	0.11	0.85
B	180.0	9.0	0.68	20	0.134	4.7	0.05	0.73
G	186.3	9.3	0.63	20	0.134	4.7	0.05	0.68
J	84.3	4.2	0.64	20	0.134	4.7	0.11	0.75
<u>Opción de restricción II</u>								
A	31.5	4.4	0.67	7.2	0.215	7.5	0.17	0.84
B	130.2	9.0	0.62	14.5	0.149	5.2	0.06	0.68
G	135.2	9.3	0.58	14.5	0.149	5.2	0.06	0.64
J	30.8	4.2	0.57	7.3	0.213	7.5	0.18	0.75
<u>Opción de restricción III</u>								
A	17.6	4.4	0.65	4.0	0.329	11.5	0.26	0.91
B	52.2	9.0	0.59	5.8	0.247	8.7	0.10	0.69
G	49.7	9.3	0.53	5.3	0.267	9.4	0.10	0.63
J	16.3	4.2	0.51	3.9	0.338	11.9	0.28	0.79

Fuentes: Cuadros 10, 11, 12 y 13.

Nota: Los valores de soporte del suelo, factor regional y resistencia del hormigón son los mismos usados en el capítulo I, sección 3.

a/ Miles de toneladas al año.

b/ Todos los costos se basan en el repavimento de asfalto sobre asfalto (ambos de 8 centímetros de espesor).

/que consumen

que consumen la vida útil del pavimento en un período de 20 años son menores que la correspondiente a la restricción I, y por lo tanto, los valores resultantes no habrían sido comparables entre sí.^{3/} Así, el criterio aplicado de mantener constante la carga anual - resultando en consecuencia variables los períodos de vida útil - es el único que permite una evaluación adecuada, pues a las tres restricciones se le asigna igual demanda, mientras que la diferencia de períodos de vida útil no constituye en sí un elemento de desequilibrio en la comparación y además esto lo justifica en la práctica la opción de repavimentar.^{4/} Asimismo, para mantener criterios equitativos, se ha escogido el método de evaluación del costo anual equivalente referido al período de vida útil resultante en cada pavimento.

a) Costo mínimo en el diseño de asfalto

La conclusión principal que se obtiene de los valores del cuadro 14 es que el menor costo económico corresponde al diseño de asfalto, restricción II, camión G. Asimismo, los valores en la restricción III son superiores a los de las otras dos, en todos los camiones tipo. Mientras que la restricción I presenta dos costos menores que los correspondientes a la II, en los camiones A y J.

^{3/} Debe tenerse presente que el propósito principal del transporte es trasladar el máximo de carga al costo mínimo. Así, el beneficio de una restricción que admite mayor peso es precisamente transportar más carga a menor costo, mientras que la contrapartida está en el mayor consumo de pavimento, o sea, en una menor vida útil de éste. Por ello el criterio aplicado es equitativo y realista.

^{4/} Nótese que en el cuadro 14 se anotan las cargas totales admisibles de cada camión tipo correspondientes a cada opción de restricción, pero que la carga anual es la misma en las tres opciones y corresponde a la que ocurriría en la opción I si se pretendiera que el pavimento durara 20 años. Estas cargas - invariables en las tres opciones de restricción para cada camión tipo en períodos anuales - consumen el pavimento, según las restricciones II y III, en períodos inferiores a 20 años (de 7 a 14.3 años en la opción II, y de 3.8 a 5.7 en la opción III). Por otra parte, se considera constante el costo de conservación actualizado para un período de 20 años, pues en los casos en que el pavimento dura menos se estima que la frecuencia de las operaciones pertinentes sería más intensa.

De lo anterior se deduce que, si bien el menor costo lo presenta la restricción II, no podría concluirse que ésta sea la mejor, pues en otros diseños - siempre en asfalto - el costo menor podría desplazarse a otras restricciones.

b) Costo en el diseño de hormigón

Es interesante observar que el diseño escogido aporta datos solamente para la restricción II, porque para las restricciones I y III está sobredimensionado y subdimensionado, respectivamente. Obviamente, cualquiera que hubiese sido el diseño escogido siempre habría sido aplicable a una sola restricción pues este tipo de pavimento, por su rígido comportamiento estructural, no absorbe eficientemente cargas distintas de las previstas en su diseño.

Así se tiene que en la restricción III los costos correspondientes a la infraestructura serían demasiado elevados, pues si se considera el camión J, el diseño sólo resiste una pasada al día durante 30 años, esto es, 10 950 pasadas en total, que si ocurrieran en un solo año, el costo de la infraestructura sería de 15 centavos de dólar la tonelada-kilómetro. Situaciones de esta naturaleza son precisamente las que se pretende evitar al restringir el peso de los camiones (pero debe considerarse que ellas no se presentan en el pavimento de asfalto, que por su comportamiento estructural flexible tiene mayor capacidad de absorción de sobrecargas). Por otra parte, el mismo camión J podría con una sola pasada romper definitivamente un pavimento de hormigón si existiesen fallas en éste o en el suelo, o bien si el peso bruto del camión fuese elevado, por ejemplo, si llegara a 70 toneladas (o sea con un incremento del 55%), consumiría la vida útil del pavimento referido con sólo 30 pasadas en total, mientras que éstas alcanzarían sólo a cinco si el peso bruto del mismo camión llegara a 80 toneladas. Consideraciones de esta naturaleza, por un lado hacen recomendable que se controle el peso por eje de los camiones, y por otro, contribuyen a que se ponga en duda la eventual conveniencia de la política de no restringir el peso de los vehículos y luego reparar el pavimento, especialmente cuando el tránsito es escaso y los pavimentos son rígidos.

/Por otra

Por otra parte, en la restricción I, que teóricamente admite ilimitadas pasadas de los camiones, los costos de la infraestructura serían muy bajos. Esto es cierto, pero no significa que la optimización se logre sobredimensionando un pavimento, pues se elevan mucho los costos de inversión, además de que se sabe por experiencia que la vida útil termina sea por la acción de agentes naturales (heladas, sismos, lluvias, derrumbes, etc.) o fallas geológicas, o bien por obsolescencia. Así, por ejemplo, si se supone una vida útil de 50 años, en la restricción I, camión A (en el supuesto que transporta 1.4 millones de toneladas anuales), el costo de la infraestructura sería de 0.52 centavos de dólar la tonelada-kilómetro, comparado con el de 0.38 en el pavimento asfáltico.

Asimismo, de la comparación de valores en el cuadro 14 (A y B) se desprende que los costos de la infraestructura en el pavimento de hormigón de 18 centímetros son de 10 a 15 veces superiores a los correspondientes al pavimento de asfalto, lo que se debe a que ambos pavimentos no son estructuralmente equivalentes. Para poder establecer comparaciones equitativas es necesario, entonces, diseñar un pavimento de hormigón que presente mayor equivalencia con el de asfalto referido.

Sin embargo, en ese intento se tropieza con dificultades causadas precisamente por el comportamiento estructural del hormigón. Por la rigidez de este pavimento las solicitaciones, o producen fatigas en cuyo caso el pavimento se desgasta en corto tiempo, lo que a su vez redunda en costos de infraestructura relativamente altos, o bien no alcanzan a producirlas, con lo que el pavimento dura indefinidamente.

Esta situación se ha obviado aumentando paulatinamente el espesor del diseño de hormigón de 18 centímetros (con lo que el intento de obtener un pavimento de hormigón que facilite la comparación con el de asfalto se traduce sólo en aproximaciones, pues el método de diseño - apoyado en tablas y ábacos - no permite un buen margen de precisión, por lo que la validez de las conclusiones es más

/teórica que

teórica que pragmática). Así, al aumentar el espesor del hormigón se incrementa también su capacidad de absorción de cargas, y pese a que también crece el costo de la inversión, el costo unitario (por tonelada-kilómetro) disminuye, tendiendo a igualarse al del asfalto. Esto ocurre hasta un espesor de 18.8 centímetros en el cual algunas cargas producen una fatiga de poco más de 50% de la fatiga del hormigón. En este caso los costos unitarios de la infraestructura en el hormigón (de 18.8 centímetros de espesor) son de dos a tres veces superiores a los del asfalto de 8 centímetros. Sin embargo, si el espesor del hormigón aumenta a 18.9 centímetros, las cargas no producen fatigas, y este pavimento admite, teóricamente, ilimitadas pasadas de los camiones tipos considerados en la restricción II. Es ésta la situación que se presenta en el cuadro 14 (C) en que se ha supuesto que el pavimento de hormigón dura 50 años y cuyo costo inicial llega a 59 mil dólares por kilómetro.

Del cuadro 14 (C) se obtienen varias conclusiones interesantes. Una es que los costos de ambos pavimentos son comparables en cuanto a valores unitarios y referidos a períodos anuales. Sin embargo, esta conclusión es válida sólo si en el pavimento de hormigón la carga asignada - igual a la del asfalto - permanece invariable durante 50 años. En caso contrario, o sea, si la carretera cumple su período de vida útil (por obsolescencia o causas naturales) antes de los 50 años, o bien si la demanda prevista no ocurre durante todo ese período, los costos unitarios del pavimento de hormigón de 18.9 centímetros de espesor, aumentan. A la inversa, si la demanda asignada a ambos pavimentos es mayor que la considerada en el cuadro 14 (C), los costos unitarios en el hormigón descienden. De todo esto se desprende, entonces, que en términos generales no es posible decidir acerca de la mayor conveniencia de uno u otro pavimento, sino que ello obedece - además de razones de tipo local propias de cada país - a los propósitos de cada proyecto o red vial, y por lo tanto, la elección sólo puede hacerse en la evaluación respectiva.

/Otra conclusión

Otra conclusión valiosa a que se llega si se consideran solamente los costos unitarios anuales (al margen de las diferencias de períodos de vida útil que presentan ambos pavimentos, las que no tienen mayor trascendencia si se considera que ambos se pueden igualar mediante repavimentaciones, véase la sección 3)), es que el pavimento de hormigón ofrece menores costos en los camiones A y J, que se apoyan en ejes simples, pero mayores en B y G, que se apoyan en ejes dobles. La explicación de esto es que el mayor desgaste relativo que produce el eje simple sobre el doble - en proporción a los pesos de ambos, respectivamente -, en este caso pierde significación pues ninguno de los cuatro camiones produce fatigas.^{5/}

La tercera conclusión es que el costo mínimo continuúa situado en la opción de restricción II, pavimento de asfalto, camión G.

Finalmente, siempre es posible diseñar pavimentos de asfalto y de hormigón que sean estructuralmente equivalentes y cuyos costos unitarios sean relativamente comparables. En consecuencia, dado que el pavimento de asfalto es el que prevalece en la red vial subregional y que por su comportamiento estructural - y método de diseño - se presta con relativa facilidad a un análisis como el presente, en adelante esta investigación se basará exclusivamente sobre este pavimento flexible, omitiéndose toda referencia al de hormigón en el entendido que éste quedará igualmente representado en el estudio.

c) Camiones tipos

En todos los casos los camiones más eficientes han sido B y G, cuyos costos resultan bastante parecidos entre sí. Los camiones A y J también tienen costos similares entre sí, pero significativamente mayores que los de aquéllos. Por lo tanto, el estudio considerará solamente los camiones A y G, pues son representativos de los costos de ambos subgrupos: el camión A es pequeño con dos ejes simples y el camión G es grande con dos ejes dobles y uno simple.

d) Repavimentación

Esta es una opción de continuidad, por lo que se analizará posteriormente.

^{5/} Este tema se vuelve a tratar en secciones posteriores.

/2. Costo

2. Costo total en tres diseños de pavimentos asfálticos

Se han escogido dos diseños adicionales de pavimento asfáltico para evaluar las tres restricciones en estudio. Los diseños tienen las siguientes especificaciones: 6 y 10 centímetros de espesor de concreto asfáltico; 15 y 25 centímetros de base de chancado; y 20 y 30 centímetros de sub-base de arena, respectivamente. Los costos de inversión y de conservación anual son, respectivamente, de 23 y 32 mil dólares/km y de 1.0 y 1.8 mil dólares/km al año. En el cuadro 15 se indican los costos respectivos agregándose los correspondientes al diseño de 8 centímetros de espesor (véanse los gráficos 5 y 6) y en el cuadro 16 se dan las pasadas diarias implícitas en la distribución de las cargas. (En ambos casos se omite presentar los cálculos, pues son idénticos a los desarrollados en el cuadro 14.)

Los valores del cuadro 15 corroboran - entre otras conclusiones que de ellos se extraen - lo señalado en el capítulo I, en el sentido que la optimación de las opciones de restricción depende de las características del parque automotor y del patrimonio vial.

Sin embargo, cabe destacar que si se consideran los dos tipos de camiones y los tres diseños de pavimento en estudio, el menor costo está en la restricción II, pavimento de 10 cm, camión G, pero muy próximo está el costo de la restricción III en esos mismos tipos de camión y pavimento. Por otra parte, si se comparan entre sí las restricciones II y III, los costos en la restricción III son siempre mayores que los correspondientes a la restricción II. En consecuencia, esta última es preferible a aquella otra de mayor límite de peso admisible por eje, en condiciones usuales de transporte. Sin embargo, dado que el incremento de los costos es menor a medida que aumentan el espesor del pavimento y la capacidad de los camiones, se infiere que la restricción III podría ser preferible en pavimentos de mayor espesor (que resultan adecuados en países o áreas en que se realice un transporte pesado y la red vial existente tenga altas especificaciones). Ello parece confirmarse en el gráfico (véase de nuevo el gráfico 6) en que ambas funciones tienden a intersectarse en el intervalo de 10 a 11 centímetros de espesor. Obsérvese también que ambas tienden asintóticamente al respectivo costo directo de operación del camión.

/Cuadro 15

Cuadro 15

COSTOS ECONOMICOS TOTALES, EN TRES OPCIONES DE DISEÑO DE PAVIMENTO
 ASFALTICO Y EN TRES RESTRICCIONES DEL PESO POR EJE
 (Centavos de dólar/tonelada-kilómetro)

Diseño (espesor del pavimento, en centímetros)	Opciones de restricción del peso por eje			Carga transportada a/ (miles de toneladas/año)
	I	II	III	
a) <u>Camión A (dos ejes simples)</u>				
6	3.02	4.11	6.37	180
8	1.09	1.27	1.56	1 400
10	0.88	0.89	0.99	4 400
b) <u>Camión G (dos ejes dobles y un eje simple delantero)</u>				
6	1.68	1.73	2.58	390
8	0.80	0.77	0.87	2 900
10	0.70	0.65	0.66	9 300

Fuente: Estimaciones (análogas a las usadas en el cuadro 14).

a/ La carga transportada se obtiene por aplicación del factor de carga de 100% al número de pasadas de camiones que consume la vida útil del pavimento respectivo en la restricción I. Por ello, obviamente, es constante en cada diseño tipo. (Véase de nuevo el cuadro 14, en el que - para el espesor de 8 centímetros - se anotan 1 400 y 2 900 miles de toneladas anuales para los camiones A y G, respectivamente.)

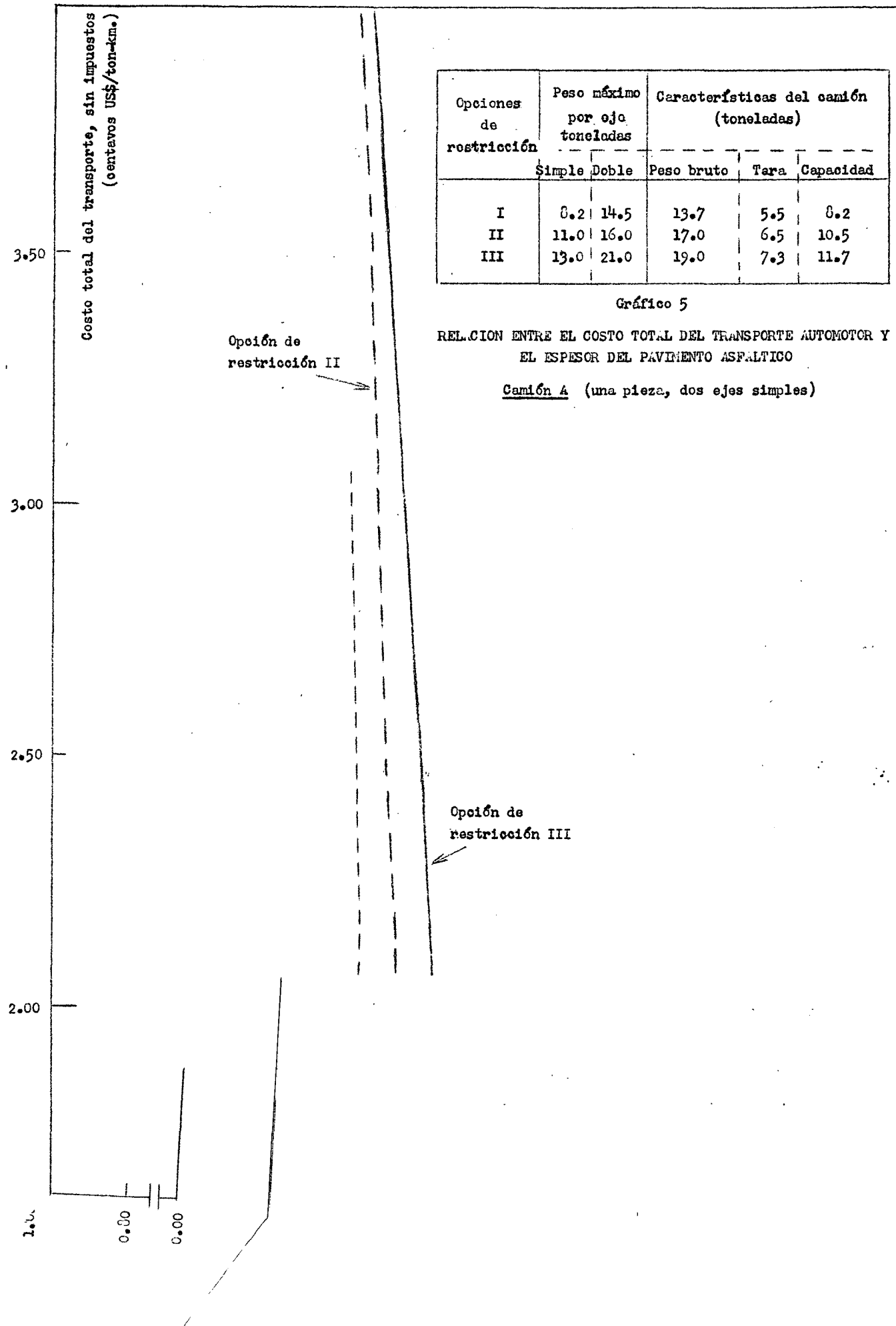
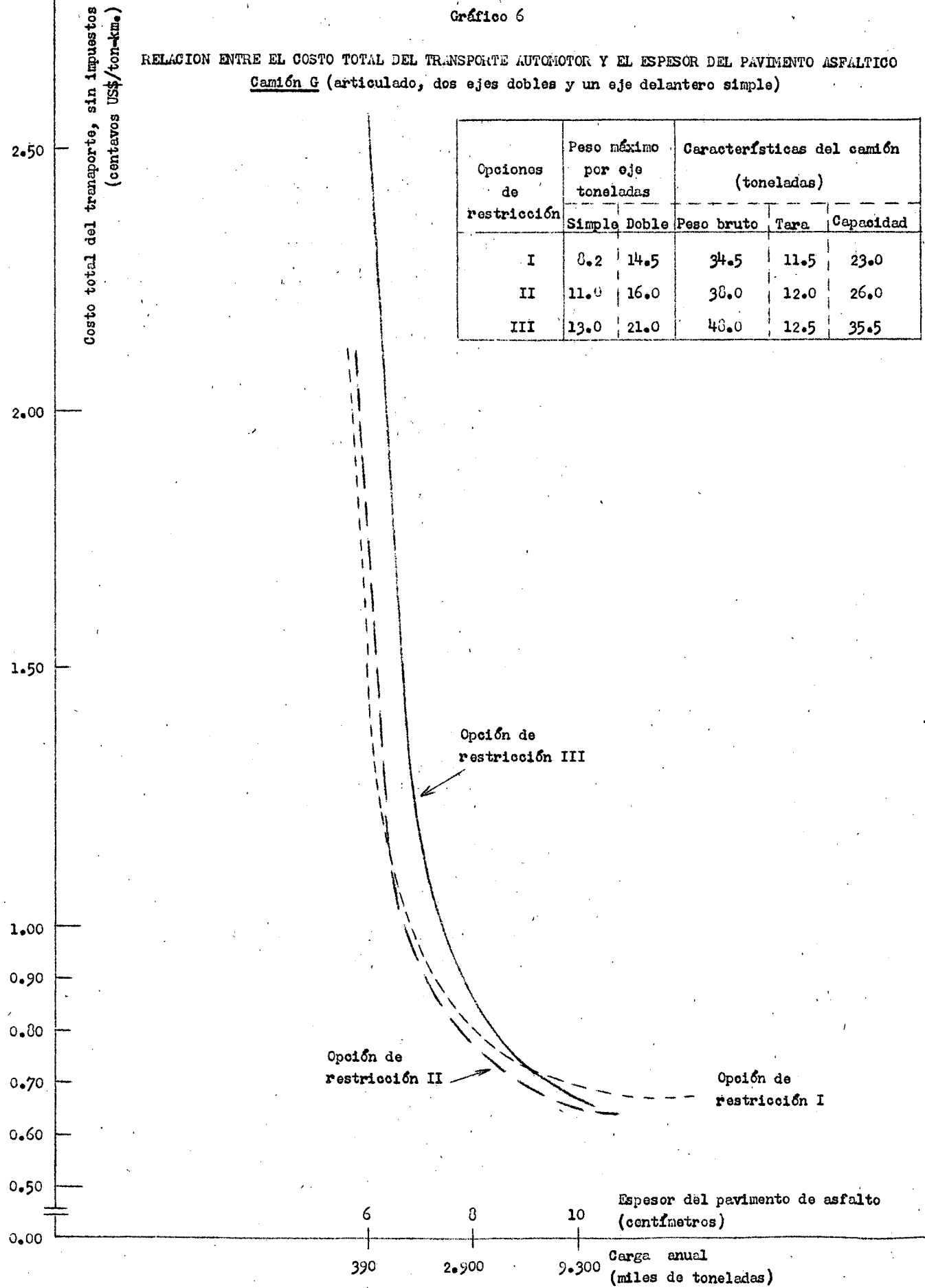


Gráfico 6

RELACION ENTRE EL COSTO TOTAL DEL TRANSPORTE AUTOMOTOR Y EL ESPESOR DEL PAVIMENTO ASFALTICO
Camión G (articulado, dos ejes dobles y un eje delantero simple)



/Cuadro 16 /

Quadro 16

PROMEDIOS DIARIOS DE PASADAS DE CAMIONES CORRESPONDIENTES A LAS
TRES RESTRICCIONES EN LOS TRES DISEÑOS TIPOS

Diseño (espesor del pavimento, en centímetros)	Pasadas diarias del camión tipo, opciones de restricción del peso por eje		
	I	II	III
a) Camión A (dos ejes simples)			
6	60	47	42
8	468	366	328
10	1 524	1 190	1 068
b) Camión G (dos ejes dobles y un eje simple delantero)			
6	47	41	30
8	346	306	224
10	1 109	981	718

Fuentes: Cuadros 9 y 15.

/Si se

Si se comparan entre sí las restricciones I y II, la segunda presenta menores costos en transportes pesados y diseños de pavimento de gran espesor, en condiciones medias son más o menos equivalentes ambas restricciones, mientras que la restricción I es claramente mejor en un diseño de poco espesor, con escaso tránsito (del orden de 50 a 60 pasadas diarias de camiones). En este caso, se llega a un costo de 3.02 centavos de dólar por tonelada-kilómetro, que es 3.4 veces mayor que el que se obtendría con el mismo camión en un pavimento más resistente y con un volumen de tránsito significativo (0.89 centavos de dólar por ton-km; pavimento de 10 cm de espesor, y más de 1 000 pasadas diarias). Por otra parte, en diseños de gran espesor, con la restricción I se puede obtener costos más o menos iguales a los correspondientes de la restricción II, pero solamente con altos volúmenes de tránsito (véase el cuadro 16), lo que se traduce en un funcionamiento menos operativo, que tiende a la congestión, consume mayor proporción de la capacidad vial, y aumenta los costos de largo plazo.

En resumen se concluye que la restricción II minimiza el costo del transporte en los casos usuales; la restricción III podría llegar a convenir en los casos de transportes muy pesados y siempre que exista una red vial adecuada (pues la repavimentación ofrece iguales expectativas a las restricciones II y III); y la restricción I parece justificarse solamente cuando el tránsito es escaso, o bien cuando se desea preservar pavimentos de baja resistencia (lo que se logra con altos costos).^{6/}

^{6/} En todos los casos presentados, el tránsito ha sido una variable dependiente de la carga máxima que se puede transportar aplicando la restricción I, durante 20 años, en cada diseño de pavimento, por la necesidad metodológica de igualar las demandas para las tres restricciones, en cada diseño. Por esta razón las demandas son constantes en cada diseño y distintas entre los diversos tipos de camiones. (Véase la sección 4 de este mismo capítulo.)

/Por otra

Por otra parte, también se desprende del cuadro que si en los pavimentos de menor resistencia se permitieran solicitudes mayores, el costo del transporte aumentaría significativamente para los camiones pequeños. Así, por ejemplo, si para el pavimento de 6 cm rigiera la restricción I y luego, sin repavimentar, se adoptara la II o la III, los costos aumentarían 36% y 110% respectivamente para el camión A y 3% y 54% para el camión G. A la inversa, si se dispusiera de pavimentos de gran espesor y se aplicara una restricción baja, no se incurriría en incrementos significativos de costos.

3. La opción de repavimentar

Según los valores del cuadro 14 (D), con el repavimento se obtienen bajos costos de transporte en las tres restricciones, siendo en general menores los correspondientes a la restricción II (excepto para el camión G, cuyo costo es casi igual que en la restricción III, y para el camión A en que también es muy parecido al de la restricción). Por lo tanto, se concluye que dado un parque de camiones de tipos más o menos variados, la opción de repavimentar conviene asociarla a la restricción II (salvo cuando se dispone de carreteras cuyos pavimentos iniciales tenían alta resistencia, en cuyo caso podría convenir la restricción III).

Es interesante observar, por ejemplo, que en el pavimento de 8 cm, camión A, la restricción I da un costo de 1.09, mientras que la restricción II da otro - mayor - de 1.24, ambos en centavos de dólar la tonelada-kilómetro. Además, la vida útil en el primer caso es mayor que en el segundo. Sin embargo, en la restricción II aquel costo descendería a 0.84 centavos la tonelada-kilómetro si se repavimentara la capa de rodadura. Se deduce, entonces, que la opción de repavimentar es adecuada y conveniente como una solución de continuidad capaz de disminuir el costo si simultáneamente se elevan los límites del peso máximo por eje.

/Sin embargo,

Sin embargo, en el ejemplo anterior, el costo derivado de la repavimentación es bajo cuando la demanda es relativamente alta (9 millones de toneladas anuales durante 20 años). Cabe entonces la interrogante que si tratándose de una demanda baja aún se justificaría repavimentar y aumentar el límite de peso por eje de la restricción I a la II.

Esta interrogante puede aclararse solamente en proyectos específicos, en que se conocen las demandas de transporte y la vida útil pretendida. Sin embargo, se desarrollará a continuación un ejercicio teórico con el propósito de conocer aproximadamente órdenes de magnitud.

Supóngase que una carretera tenga un pavimento de 8 cm de espesor, que lleve cinco años en servicio, y que en ella rija la restricción I; supóngase además, que existe una demanda de 1.4 millones de toneladas anuales durante 15 años, que consumiría totalmente la vida útil residual del pavimento, y que sólo se dispone del camión A. Las opciones serían realizar el transporte en las condiciones descritas o repavimentar y adoptar la restricción II. En este segundo caso se escogería un repavimento que admitiera la solicitud de 1.4 millones de toneladas durante 15 años y así consumiera totalmente su vida útil.

El análisis de ambas opciones se plantea así.

a) Inversión en repavimentación

La solicitud total es de 21 millones de toneladas que se transportarían en un camión A, que con la restricción II movería 10.5 toneladas por viaje, consumiendo 4.3 ejes equivalentes por pasada. O sea, requeriría 2.0 millones de viajes, con lo que consumiría 8.6 millones de ejes equivalentes, que a su vez están asociados a un número estructural de 10.1. El número estructural

/inicial del

inicial del pavimento existente 7/ era de 9.3, pero como la capa de rodadura se ha desgastado durante 5 años, se le supondrá un espesor de 7.5 centímetros, mientras que el factor de ponderación (a_i) habría disminuido a 0.40, o sea, que el pavimento inicial tendría a los cinco años un número estructural de 8.8. Así, el repavimento sería de tres centímetros para elevar el número estructural de 8.8 a 10.1. La inversión - teórica - requerida sería aproximadamente de 5 000 dólares por kilómetro.

b) Costos en ambas opciones

Se presentan en el cuadro 17.

7/ Se obtiene por el método siguiente:

Capa de rodadura	Material	Pavimento original			Pavimento usado			Repavimento		
		a_i	Espe-sor	NE	a_i	Espe-sor	NE	a_i	Espe-sor	NE
Repavimento	Asfalto	-	-	-	-	-	-	0.44	3	1.3
Pavimento	Asfalto	0.44	8	3.5	0.40a/	7.5a/	3.0	0.40a/	7.5a/	3.0
Base	Chançado	0.14	20	2.8	0.14	20	2.8	0.14	20	2.8
Sub-base	Arena	0.10	30	3.0	0.10	30	3.0	0.10	30	3.0
<u>Totales</u>				<u>9.3</u>			<u>8.8</u>			<u>10.1</u>

a/ Estas disminuciones de espesor y ponderación se adoptan de forma tentativa y según criterios conservadores.

/Cuadro 17

Cuadro 17

COSTOS DE TRANSPORTE CON EL CAMION A EN LAS OPCIONES
DE REPAVIMENTAR O DE CONTINUAR CON EL PAVIMENTO INICIAL

(Por kilómetro)

Rubro	Unidades	Opciones	
		Se mantienen el pavimento y la restric- ción I	Se repavimenta y se adopta la restricción II
Carga anual	Miles de toneladas	1.4	1.4
Costo unitario de operación	Centavos de dólar/ton-km	0.74	0.67
Costo anual de operación	Miles de dólares	10.4	9.4
Costo anual de conservación	Miles de dólares	1.3	1.3
Total costos anuales de operación más conservación	Miles de dólares	<u>11.7</u>	<u>10.7</u>
Factor de actuali- zación (15 años y 12% anual)	-	6.811	6.811
Total de costos anuales actualizados	Miles de dólares	79.7	72.9
Inversión consumida	Miles de dólares	<u>0.0</u>	<u>5.0</u>
Costo total (para la tasa de actualización del 12% anual)	Miles de dólares	<u>79.7</u>	<u>77.9</u>
Costo total (para una tasa de actualización del 18% anual)	Miles de dólares	<u>59.6</u>	<u>59.5</u>

Fuente: Estimaciones.

/c) Conclusiones

c) Conclusiones

Del ejercicio teórico se desprende que la repavimentación es una buena opción pues minimiza el costo del transporte al permitir que se adopte una restricción de mayor peso máximo por eje. Además, la inversión requerida tiene una rentabilidad más o menos alta.

Sin embargo, si bien ello queda demostrado en el ejercicio, cabe hacer dos observaciones importantes:

- En el ejercicio se adoptó un espesor, estrictamente teórico, de sólo tres centímetros con el propósito de que el pavimento existente y el repavimento fueran estructuralmente equivalentes de manera que ambos satisficieran la demanda de tránsito en el mismo tiempo, y sin valor residual. En ese caso el repavimento es claramente beneficioso, pero no lo habría sido si se hubiera adoptado un espesor mayor pues en ese caso el valor residual no compensaría lo suficiente. Generalizando, el repavimento es una buena opción siempre que la demanda de tránsito sea significativa y que la restricción que se adopte permita mayores pesos por eje.

- La conclusión anterior no es válida cuando se tiene el propósito de repavimentar para aumentar el límite de peso por eje de la restricción II al de la restricción III, pues en este último caso los costos son mayores. Sin embargo, cuando los pavimentos iniciales tienen un espesor de más de 10 centímetros, y la demanda de tránsito es alta, puede ser conveniente adoptar el límite de la restricción III y repavimentar.

4. Discusión metodológica de las conclusiones

Las conclusiones del presente informe son válidas para los elementos cuantitativos que le sirvieron de base, y no podrían aplicarse libremente a todos los países y áreas de la subregión, pues éstos bien pueden presentar valores distintos, en cuyo caso las conclusiones pueden tener matices diferentes.

Los factores que califican el análisis presentado son numerosos, según ya se anotó en la introducción y se estima que la cuantificación de la influencia de cada uno, por un lado, rebasaría

/los propósitos

los propósitos del presente informe, y por otro, no aportaría nuevos antecedentes de significación. Sin embargo, es posible hacer algunas calificaciones al respecto, especialmente con algunos parámetros cuyo intervalo de variación está más o menos acotado. El caso más típico es el de los costos de operación y de la infraestructura, cuya influencia es significativa. Así, por ejemplo, estructuras de costo diferentes a la usada en el estudio podrían hacer más convenientes - optativamente - las restricciones I y III que la II, especialmente en lo que se refiere a la proporción de los costos de la infraestructura con respecto a los de operación. Mientras se mantenga la misma proporción en los valores usados en este informe, siempre será preferible la restricción II - en el supuesto que los demás parámetros estén representados con aproximación -, pero si un país, por ejemplo, lograra ejecutar obras de infraestructura a un costo menor, o bien tuviera mayores costos de operación o, finalmente, dispusiera de una infraestructura vial de gran resistencia, entonces el óptimo en este país se desplazaría de la restricción II hacia la III. A la inversa, si los costos de la infraestructura resultaran mayores y los de operación menores, entonces la solución óptima estaría entre las restricciones II y I. Lo mismo ocurriría si la tasa de actualización fuese menor o mayor que la usada. Asimismo, los costos de operación usados son directos y los únicos componentes considerados son los combustibles y lubricantes, llantas, depreciación y conservación.

A continuación se presentan algunos alcances metodológicos sobre la confiabilidad de las conclusiones, que se obtuvieron sobre la base de valores y criterios determinados.

a) Influencia de la magnitud de la demanda de tránsito

Parecería lógico suponer que la magnitud de la demanda de tránsito influya en la optimación del peso por eje. Si fuese así, el estudio adolecería de una cierta limitación, pues se usó un solo

/volumen de

volumen de demanda para cada diseño de pavimento tipo.^{8/} En el cuadro 18 se presenta un caso de variación de la demanda referido al camión A y al pavimento flexible de 8 centímetros de espesor, considerando las restricciones I y II.

Cuadro 18

COSTOS TOTALES PARA EL CAMION A EN PAVIMENTO ASFALTICO DE 8 CENTIMETROS DE ESPESOR Y CONSIDERANDO DIVERSAS DEMANDAS

Demandas (miles de ton/año)	Costo (centavos de dólar/tonelada-kilómetro)	
	Opciones de restricción	
	I	II
1 000	1.22	1.33
1 400	1.09	1.27
2 000	1.02	1.19
3 000	0.97	1.15
5 000	0.93	1.10
7 000	0.92	1.03

Fuente: Estimaciones (análogas a las del cuadro 15).

Del cuadro se extraen varias conclusiones de interés. En primer lugar, los valores obtenidos corroboran los valores del cuadro 15 (camión A, pavimento asfáltico de 8 centímetros de espesor), y confirman conclusiones formuladas anteriormente. También pareciera desprenderse que en un pavimento dado la optimización de las restricciones sería independiente de la demanda. Esto parece ser cierto, pero con dos salvedades. Esta afirmación es sólo

^{8/} Véase de nuevo el cuadro 15 en el que se anotan las cargas transportadas en cada diseño tipo de pavimento que consumen la vida útil de cada pavimento en la restricción I.

válida en primer término, siempre que se mantengan las proporciones dadas en el presente estudio para los costos de la infraestructura, por un lado, y los de operación, por otro; y para la tasa de actualización usada. Si estos parámetros cambiaran, las funciones de costos versus demandas correspondientes a diversas restricciones podrían intersectarse, y lo mismo podría ocurrir, aun con la misma estructura de costos, pero referida a otros pavimentos y camiones. En segundo término, sólo es válida en intervalos de demandas medias. Así, no es válida - más que en teoría - en demandas muy bajas, para las cuales el pavimento, en la restricción más baja, duraría hipotéticamente de 50 a 100 años, pues en este caso el cálculo no tiene otra alternativa que suponerlo útil en todo el período, lo que la realidad desmiente;^{9/} tampoco es válida en demandas muy altas, con las cuales el pavimento duraría sólo un año o menos aún, en cuyo caso el problema y costo principal lo constituye la congestión del tránsito y consecuentemente la metodología seguida pierde representatividad.

Ambas situaciones, obviamente no pueden superarse en un estudio de la naturaleza de éste, sino solamente en estudios análogos realizados para países, áreas o proyectos específicos.

Finalmente, también se concluye que si en un país o área la restricción de peso por eje prevaleciente permite que el costo de los pavimentos existentes sea mínimo, la adopción de una restricción que prevea mayores pesos por eje debe necesariamente acompañarse de una repavimentación, única posibilidad de disminuir costos totales.

b) Criterios de asignación de costos de la infraestructura a las pasadas de los vehículos

En este estudio se ha asignado la totalidad del costo de la infraestructura a las pasadas de los vehículos de acuerdo con su efecto de desgaste, pese a que la inversión considerada se refiere a una calzada de siete metros de ancho (o sea de dos pistas), y a que los vehículos considerados aparentemente desgastan sólo una pista.

Sin embargo, toda la teoría desarrollada y los ensayos realizados siempre suponen una calzada de dos pistas, pero sólo una de ellas

^{9/} Pues según ya se anotó, la vida útil termina por efectos de agentes naturales o por obsolescencia.

absorbe tránsito pesado mientras que la otra se limita al tránsito liviano y a camiones en que el factor de carga del retorno es bajo. Asimismo, como la calzada de dos pistas es una unidad estructural, los efectos de las sollicitaciones se distribuyen. Esto se ha comprobado en la práctica, observando que la pérdida o consumo de resistencia, los baches, agrietamientos y desgastes en general ocurren de forma más o menos similar en ambas pistas aunque tengan sollicitaciones distintas. Además, las interrupciones del tránsito en una pista se superan mediante el uso en ambos sentidos de la otra. Por estas razones, se consideró que era más representativo de la realidad imputar la totalidad del costo de la infraestructura a cada pasada de camión, cuyo factor de carga se supuso del 100%.

Sin perjuicio de lo anterior, sólo con propósitos teóricos, se anotan a continuación los costos que resultarían si se considerara sólo el 50% del costo de la infraestructura ^{10/} más los costos de operación.

Cuadro 19

COSTOS DE OPERACION MAS EL 50% DE LOS COSTOS DE LA INFRAESTRUCTURA

(Centavos de dólar/tonelada-kilómetro)

Diseño (espesor del pavimento en centímetros)	Opciones de restricción de peso por eje		
	I	II	III
a) Camión A. (dos ejes simples)			
6	1.88	2.39	3.51
8	0.91	0.96	1.11
10	0.81	0.78	0.82
b) Camión G (dos ejes dobles y uno simple)			
6	1.16	1.16	1.56
8	0.72	0.68	0.70
10	0.67	0.62	0.60

Fuente: Estimaciones (análogas a las del cuadro 15).

^{10/} En estricto rigor, no procedería aplicar el 50%, pues la inversión necesaria para construir la pista de diseños es bastante mayor que la mitad del costo correspondiente a ambas. Sin embargo, se aplicará el 50% pues se trata de un ejercicio teórico.

/Los valores

Los valores del cuadro 19 llevan casi a las mismas conclusiones anteriores con la diferencia que amplían el intervalo en que la restricción II minimiza el costo con respecto a la restricción I. Así, en comparación con los valores del cuadro 15 (que incluyen la totalidad del costo de la infraestructura) se observa que esta restricción minimiza también el costo, en el pavimento de 10 centímetros, para el camión A (aunque es levemente inferior al de la restricción I), y en el de 6 centímetros, para el camión G, el costo coincide con el correspondiente a la restricción I. Por otra parte, en el pavimento de 10 centímetros, los costos mínimos para el camión G se desplazan desde la restricción II a la III.

De lo anterior se concluye que entre este método de asignación de costos y el anterior no existen discrepancias de significación pues la minimización del costo se inclina apenas hacia una u otra restricción solamente cuando los valores del cuadro 15 casi coinciden. Por consiguiente, la conclusión principal del estudio no sólo permanece inalterable sino que se refuerza.

Por otra parte es interesante observar que si los valores del cuadro 19 se interpretan como representativos de un país o área en que los costos de la infraestructura sean 50% más bajos que los considerados en la mayor parte del estudio, se muestra que en la medida que la infraestructura tenga menor valor, la optimización del costo del transporte automotor se desplaza hacia restricciones que permiten mayores pesos por eje, aunque en medida poco significativa.

c) Representatividad y cobertura de los costos de operación adoptados para los vehículos

De las dos secciones precedentes se ha desprendido que las conclusiones del presente estudio son válidas sólo para determinados intervalos de valores de la demanda y de los costos de la infraestructura, respectivamente. Sin embargo, esta conclusión no podría aplicarse libremente a eventuales variaciones de los costos de operación, pues ese caso podría presentar una sensibilidad distinta.

/Es muy

Es muy importante, entonces, verificar la representatividad y cobertura de los valores de los costos de operación adoptados. A continuación se hacen algunos alcances cualitativos sobre varios aspectos que eventualmente podrían traducirse en costos distintos.

i) Representatividad del promedio adoptado. En todo el desarrollo del estudio se usa - para cada camión tipo en cada opción de restricción - un solo valor que se obtuvo como promedio aritmético de los valores que respectivamente corresponden a los países andinos. Por lo tanto, el valor utilizado es representativo del promedio subregional en la misma medida que lo sean los valores de los respectivos países. Estos últimos se calcularon 11/ en épocas distintas 12/ aunque para casi todos ellos se usó la metodología que al respecto recomienda el Banco Mundial. 13/ Así, en algunos casos, generalmente por falta de información en los países, la adaptación de esa metodología a las situaciones específicas de cada lugar, pudo haber sido incompleta o insuficientemente actualizada (especialmente si se considera que las fechas de los informes de los países fluctúan alrededor de 1970, mientras que la metodología referida se basa sobre valores indicativos relativamente más antiguos). Así, el método seguido en el presente estudio consistió en actualizar esos valores - supuestamente válidos para el año de referencia de la misma información - a 1973, y el mismo procedimiento se aplicó a los costos de la infraestructura. 14/ Por lo tanto, queda la interrogante si los valores básicos usados para obtener el promedio subregional son o no suficientemente representativos.

11/ Por los funcionarios nacionales o por grupos consultores.

12/ Véase de nuevo la bibliografía referida en la nota 25 del capítulo I.

13/ Jan de Weille, Cuantificación de los ahorros de los usuarios de carreteras, Serie de Estudios del Personal del Banco Mundial, número 2, 1966.

14/ En el capítulo I, sección 4, se anotó que la actualización a esa fecha, anterior a la crisis de la energía, implicaba menor riesgo de error de estimación, pues las políticas aplicadas con posterioridad fueron divergentes en los países.

/ii) Componentes

ii) Componentes de costo considerados. Es usual en los estudios de transporte carretero cuyo objetivo principal es la infraestructura - o la limitación de su utilización - considerar sólo algunos componentes del costo de operación de los vehículos, prescindiéndose de otros que serían intrascendentes.

En estricto rigor metodológico, corresponde considerar solamente los elementos que resultaren afectados como consecuencia de las opciones que se estudien. Así, por ejemplo, en un estudio sobre el mejoramiento de la infraestructura vial, en general no correspondería considerar los costos de carga y descarga o los gastos generales de las empresas de transporte automotor, pues éstos no se alteran en las opciones, con o sin la mejora vial en estudio, y en cuyo caso el beneficio asignable al proyecto - o sea, la diferencia que presenta el mismo concepto en ambas opciones - es cero. Sin embargo en situaciones especiales esos mismos dos componentes pueden presentar diferencias en una u otra opción, pero no como consecuencia directa del proyecto, sino apoyándose en ciertos supuestos (por ejemplo, que la mejora vial generaría más tránsito, lo que redundaría en menores gastos generales y de carga-descarga), pero en cuyo caso es necesario, primero, demostrar el supuesto y, luego, computar los beneficios y costos que él significa.

En el presente estudio se consideraron cuatro componentes del costo de operación: combustible y lubricante, llantas, conservación, y depreciación, todos variables con la distancia, y también, obviamente, con una u otra restricción de peso máximo por eje. Sin embargo, deberían haberse considerado además los componentes de los costos de oportunidad del tiempo del chofer y del capital (invertido en el camión), dado que toman valores distintos en las diversas restricciones pues, aunque la demanda anual es constante en ellas tres el número de viajes para transportarla es distinto.

/Como ya

Como ya se señaló se consideraron solamente los primeros cuatro componentes por cuanto la información básica - disponible en los países - se refiere exclusivamente a ellos en la mayoría de los casos. Por otra parte, la cuantificación de los dos componentes no considerados reviste dificultades de cierta significación, pues a la carencia de información pertinente se agregan las enormes variaciones que presentan en los distintos países.

En consecuencia, a los cuatro componentes de costo usados no fue posible agregar, con un margen razonable de confiabilidad esos otros dos elementos, lo que sólo es posible hacer para cada país. Por lo tanto, es importante calificar la influencia que tendría su consideración. Desde luego, ello se traduciría en un incremento del costo de operación, lo que a su vez tendería a desplazar la optimización de las restricciones hacia límites mayores, o sea, desde la restricción II hacia la III. Sin embargo, cabe destacar que ese desplazamiento es una tendencia y no, necesariamente, un cambio de ubicación del óptimo ya que, evidentemente, dependerá de la magnitud de los dos nuevos componentes del costo.^{15/}

iii) Factor de carga. Los costos unitarios se calcularon suponiendo un factor de carga de 100%, aspecto ya mencionado. Sin embargo, si la utilización de la capacidad del camión fuese distinta, los costos unitarios resultarían igualmente diferentes. Así, por ejemplo, en una zona agrícola de un país dado, el factor de carga podría ser de 40%, y en ese caso los costos unitarios se incrementarían prácticamente en 150%. Asimismo, en los países en que se han realizado investigaciones sobre pesaje de camiones, se ha comprobado que buena parte de ellos ocupa mucho más del 100% de su capacidad teórica, en cuyo caso - aparentemente - el costo unitario de corto plazo disminuiría significativamente.

^{15/} Cabe insistir, apoyándose en algunas estimaciones, en que ambos componentes tienen valores muy distintos en los diversos países andinos, por lo que la verificación debe hacerse en cada país. Por otra parte, debe tenerse presente que la valoración económica de estos dos componentes influye aún más para que tengan valores diversos en los distintos países.

Este tipo de especulaciones no puede incorporarse al presente estudio en razón de su alcance subregional, pero contribuye a obtener dos conclusiones interesantes. La primera es que en un estudio específico, para un determinado país, área o red vial, deben considerarse los parámetros propios de cada uno de ellos, muy especialmente los que se vinculan a los costos; y la otra es que resultaría superfluo plantear un análisis de sensibilidad a las conclusiones del presente estudio.

d) Variación de los supuestos en el cálculo de los costos totales de repavimentación

Los costos totales de las capas de rodadura repavimentadas estudiados en la sección 1, se calcularon aplicando criterios pesimistas. Así, se supuso que la primera capa de pavimento había perdido 25% de su espesor en las partes afectadas por huellas y que la pérdida de resistencia del hormigón asfáltico había llegado a 40% del valor inicial. Ambos supuestos implican que el pavimento por repavimentar tuvo una utilización intensa, encontrándose próximo a cumplir su vida útil, y que su conservación fue insuficiente. Asimismo es exagerada la estimación del costo de inversión de 25 mil dólares por kilómetro (frente a 27 mil dólares estimados para un pavimento nuevo) que se adoptó, agregándole al costo propio de la repavimentación otros valores derivados de los supuestos que las obras se realizarían en una carretera intensamente transitada, que habría deformaciones en las diversas capas (de pavimentos y bases), etc.

El conjunto de supuestos resulta bastante pesimista, y esto lo justifica el propósito de no abultar las ventajas de la repavimentación, toda vez que en este estudio se ha presentado como la mejor opción. Una solución es más convincente cuando sus beneficios se exponen de forma conservadora.

Sin perjuicio de lo anterior, resulta interesante y útil calcular los costos totales del transporte automotor en capas de rodadura repavimentadas, en caso de que se apliquen criterios de

/evaluación no

evaluación no tan pesimistas. En el cuadro 20 se anotan los costos de la infraestructura y de operación, según la restricción II, para los camiones A y G, considerando un repavimento de 8 centímetros sobre una capa de rodadura que inicialmente fue de asfalto, también de 8 centímetros de espesor, calculados con criterio pesimista (los mismos valores del cuadro 14) y moderado. Este último se calculó con la misma metodología aplicada en los cuadros 10 a 14, y suponiendo que la pérdida de espesor es de 12%, la pérdida de resistencia (o sea, la disminución de a_1) es de 20%, y que el costo de inversión es de 20 mil dólares por kilómetro.

Cuadro 20

COSTOS TOTALES DE LA CAPA DE RODADURA REPAVIMENTADA,
DE 8 CENTÍMETROS DE ESPESOR, CONSIDERANDO LA RESTRICCIÓN II,
Y SEGUN CRITERIOS PESIMISTA Y MODERADO
(Centavos de dólar por tonelada-kilómetro)

Tipo de camión	Criterio pesimista			Criterio moderado		
	Infra- estructura	Operación	Total	Infra- estructura	Operación	Total
A	0.17	0.67	0.84	0.12	0.67	0.79
G	0.06	0.58	0.64	0.04	0.58	0.62

Fuente: Cuadro 14 y estimaciones.

De los valores del cuadro se desprende que la adopción de criterios moderados se traduce en menores costos totales. Sin embargo, la diferencia es pequeña, pues las disminuciones llegan sólo a 6% en el camión A y 3% en el camión G. Esto se debe a que el componente determinante del costo total de la capa repavimentada es el costo de operación, que se mantiene constante, y pese a que las disminuciones de costo debidas a la infraestructura son significativas pues llegan a 30% en el camión A y 33% en el camión G.

/La principal

La principal conclusión, entonces, es que la ventaja de la repavimentación radica precisamente en que permite optimar el costo de la infraestructura. Asimismo, para lograr este costo óptimo no resulta tan determinante en el costo total el estado de la infraestructura, ya que entre un estado deficiente y otro más o menos bueno, los respectivos costos totales tienen escasa diferencia. Se confirma, además, que la condición necesaria para obtener efectivamente los beneficios que derivan de una repavimentación como asimismo recuperar la inversión que representa, es utilizar camiones más grandes - o los mismos con una carga mayor - lo que a su vez implica a veces el aumento de los límites de peso máximo por eje. (Véanse de nuevo los cuadros 15 y 16.)^{16/}

e) Influencia de la variación de las taras de los camiones

El presente estudio se basa sobre determinadas taras de camiones que, si bien varían con las restricciones dado que los vehículos requieren mayores o menores refuerzos según su respectivo peso bruto, son las más usuales en los tipos de camiones y de restricciones estudiados (véase de nuevo el cuadro 8).

Sin embargo, existen otras posibilidades de camiones con taras menores y es probable que esto afecte al parque automotor subregional, pues varias de las empresas que postulan en la programación automotriz lo hacen con camiones proyectados con taras menores que las usadas en este estudio. Para obviar la probable discrepancia que a raíz de ello podría aparecer en las conclusiones logradas, se verifica a continuación el efecto que tendría en ellas la eventual disponibilidad de camiones con menores taras en el parque subregional.

En el cuadro 21 se anotan las características en cuanto a tara, capacidad y peso bruto que tendrían los eventuales nuevos tipos de

^{16/} Con esto obviamente no se desconocen las ventajas de repavimentar capas de rodadura deterioradas cuya utilización se traduce en un alto costo de operación.

camiones, que se les identifica como A', B', G' y J' para distinguirlos de sus homólogos evaluados en el presente informe (cuyas características también se anotan con el propósito de efectuar comparaciones).

También se agrega en el cuadro la restricción que corresponde a las características de peso de los camiones, de cuya asociación se desprende su capacidad máxima utilizable y consecuentemente, el peso bruto.^{17/} Luego se agregan los costos de operación de los camiones (suponiéndose que también sean aplicables a los camiones con menores taras) y los costos unitarios.

^{17/} No se pretende emitir un juicio respecto de si determinados tipos de camiones podrían o no circular en las carreteras de la subregión sino, simplemente, asociar determinadas características de peso de los camiones de menor tara con la restricción que permita la mayor utilización de la capacidad de los camiones. Así, por ejemplo, el camión A' tiene un peso bruto de 19.5 toneladas si se utiliza con una carga de 13.6 toneladas, en cuyo caso el peso por eje supera los límites que impone la restricción III. Por lo tanto, se considera una carga de sólo 13.1 toneladas con lo que el peso bruto desciende a 19.0 toneladas, límite que queda dentro de la restricción III.

Cuadro 21

COMPARACION DE ALGUNAS CARACTERISTICAS DE CAMIONES
DE MENOR TARA CON LAS DE SUS HOMOLOGOS MAS USUALES

Camión tipo	Tara Capa- Peso ciudad bruto (Toneladas)			Restricción correspon- diente a tara, capa ciudad y peso bruto	Capacidad máxima utilizable sin sobre- pasar la restric- ción (Toneladas)	Peso bruto máximo que sobrepase la restric- ción (Toneladas)	Costo de ope- ración (dólares por kiló- metro)	Costo unitario de ope- ración (centavos de dólar por tone- lada-kiló- metro)
A	7.3	11.7	19.0	III	11.7	19.0	0.076	0.65
A'	5.9	13.6	19.5	III	13.1	19.0	0.076	0.58
B	8.0	14.0	22.0	II	14.0	22.0	0.087	0.62
B'	7.0	17.5	24.5	II	15.0	22.0	0.087	0.58
G	12.0	26.0	38.0	II	26.0	38.0	0.150	0.58
G'	10.0	30.0	40.0	II	28.0	38.0	0.150	0.54
J	12.5	32.5	45.0	III	32.5	45.0	0.166	0.51
J'	10.5	34.5	45.0	III	34.5	45.0	0.166	0.48

Fuentes: Cuadros 8 y 11 y especificaciones (y anteproyectos) de diversos modelos de camiones.

De los valores del cuadro 21 se desprende, con respecto a la optimación de las restricciones, que la variable - distinta de las consideradas en el estudio - que introducen al análisis los camiones con menores taras, es su menor costo teórico de operación pues el desgaste de la infraestructura sería el mismo que ocasionan los respectivos camiones homólogos analizados, dado que son idénticos el peso bruto y su distribución en los ejes.

/Por lo

Por lo tanto, se concluye que la utilización de camiones con menores taras - como las anotadas en el cuadro 21 - no altera la conclusión que la optimación del transporte automotor se sitúa en la vecindad de la restricción II. Esto obedece a que las posiciones relativas (anotadas en el cuadro 15) de los menores costos totales con respecto a las tres restricciones, se mantienen inalterables al aplicar los nuevos costos de operación (del cuadro 20) y determinar con ellos nuevos costos totales.

Por otra parte, es interesante observar que las limitaciones de 16 toneladas por eje doble y de 38 toneladas de peso bruto de la restricción II limitan la posibilidad del camión G de transportar contenedores de 40 pies.

f) Materias sobre las que no existen suficientes antecedentes o investigaciones

Entre los temas que se analizan en el presente estudio hay materias sobre las cuales no existen suficientes investigaciones o bien los antecedentes son escasos. Este hecho, si bien no limita la metodología, el alcance ni las finalidades del estudio, impide en cierta medida que se profundice en el análisis de algunas materias.

Sin embargo, se presentan a continuación algunos antecedentes sobre la influencia de la distancia entre ambos ejes del tándem y equivalencia entre ejes simples y dobles; influencia del peso máximo del camión; influencia del efecto dinámico; y compatibilización de las restricciones de peso máximo por eje con el parque automotor.

i) Influencia de la distancia entre ambos ejes del tándem y equivalencia entre ejes simples y dobles. En el desarrollo del estudio se supuso siempre que el efecto estructural de todo eje tándem es constante - e igual a los ejes equivalentes anotados en el cuadro 4 -, cualquiera que sea la distancia entre ambos ejes que lo componen.

/Ese es

Ese es un buen planteamiento, pero cabe reconocer que existen diferencias entre los respectivos efectos de los ejes tándem cuyas distancias entre ejes son diferentes.

Sin embargo, con el propósito tanto de clarificar las hipótesis en que se apoya el presente estudio cuanto de permitir que éste pueda rehacerse con hipótesis distintas, cabe señalar que la equivalencia adoptada entre los ejes simple y doble en función de la distancia que media entre ambos ejes que conforman el tándem correspondería a la relación referida en el Journal Officiel des Communautés Européennes:18/

$$F = 0.6x + 0.8, \text{ en la que}$$

x , es la distancia entre ambos ejes del tándem, en metros, y condicionado a $1 < x \leq 2$;

F , es el factor de equivalencia del eje tándem respecto del eje simple.

Es interesante observar que si esa relación se aplica a una distancia entre ambos ejes de 1.35 a 1.37 metros - caso más o menos usual - se llega a un factor $F = 1.6$ que si a su vez se aplica, por ejemplo, a la restricción de 11 toneladas por eje simple, se llega a un eje doble equivalente de 17.6 toneladas, que es 10% mayor que el límite adoptado para el eje tándem en la Decisión 94 (esto puede justificarse como margen de seguridad - para disminuir la acción solicitante del eje doble sobre el pavimento y, principalmente, sobre los puentes - o bien en la Decisión 94 se consideró un eje tándem cuyos ejes distan 1.10 metros); si la relación se aplica a la restricción de 8.2 toneladas por eje simple, se llega a 13.1 toneladas por eje doble, que es 9% inferior al adoptado en Colombia para el eje doble; mientras que para un eje simple de 13 toneladas se llega a otro doble de 20.8 (por lo que en el presente estudio se adoptó en la restricción III los límites de 13 toneladas para el eje simple y de 21 toneladas para el eje doble).

18/ No C90/25, del 11 de noviembre de 1971.

En cuanto a la equivalencia del eje doble respecto del eje simple de 11 toneladas, es interesante destacar que en la subregión existe bastante disparidad, pues se han adoptado (para el eje doble, cuadro 2) los siguientes valores: Bolivia, 14.5 toneladas; Perú, 18 toneladas; y Ecuador, 19 toneladas, entre los que se sitúa el correspondiente a la Decisión 94 con las ya referidas 16 toneladas. Cabe agregar que Chile, con un valor de 12 toneladas por eje simple (si bien permite la circulación de camiones del parque de hasta 18 toneladas por eje doble), restringe la importación de camiones de sólo 16 toneladas por eje doble.

La gran variedad de límites en la subregión puede deberse, en parte, a que no se ha investigado suficientemente el efecto estructural del eje doble, o bien, a que en los respectivos parques existen camiones con diferentes distancias entre ejes, o más probablemente, a que los criterios de asignación de cargas a los puentes - en el cálculo estructural de los mismos -, suponen distintas magnitudes a la sollicitación del eje doble en los diversos países andinos.

ii) Influencia del peso máximo del camión. Otro efecto estructural más o menos relevante es el que produce el conjunto de ejes, por sobre el que ejerce cada uno de ellos por separado. Precisamente para limitar este efecto, se restringe también el peso total del camión.

En el presente estudio, si bien no se desprecia ese efecto, el análisis se limita a admitir que las limitaciones de peso máximo del camión adoptadas en los países lo hacen irrelevante. Esto es especialmente válido para las 38 toneladas adoptadas en la Decisión 94, que están por debajo de lo usual. Así, por ejemplo, en la Comunidad Europea,^{19/} para un límite de peso máximo admisible de 11.5 toneladas por eje simple, las limitaciones de peso máximo del camión son 42 toneladas en los camiones "articulados" y "con acoplado"; 18 toneladas

^{19/} Véase Ibidem.

en el camión de una pieza que tiene dos ejes; y 25 toneladas en el mismo anterior si tiene más ejes. En cambio, las regulaciones propuestas por la Unión Internacional de Transporte por Carreteras 20/ limitan el peso bruto del camión "articulado" y "con acoplado" a 45 toneladas. Mientras que las regulaciones norteamericanas 21/ se apoyan en relaciones matemáticas de las que se desprende que el peso máximo del camión articulado (con 1 eje simple y dos dobles, y con 53 pies de longitud) es de 79 000 libras (35.8 toneladas) y del camión con acoplado (con 6 ejes y 60 pies de longitud), de 88 000 libras (40 toneladas).

De lo anterior se obtienen dos conclusiones principales. Una es que existe también cierta variedad de límites de peso máximo total del camión, debido en parte a la supuesta falta de antecedentes técnicos al respecto y, también, a la diversidad de criterios con que se adoptan las limitaciones (pues la regulación europea es concordante con los criterios de diseño de pavimentos, mientras que la regulación norteamericana es típicamente una limitación del tren de cargas que solicitará los puentes). La otra conclusión, que tiene relación directa con el estudio, es que resulta innecesario verificar el efecto estructural del límite de 38 toneladas del peso bruto del camión, pues es relativamente bajo. (Sin embargo, los países que han elevado los límites inicialmente adoptados deben verificar el efecto estructural del peso bruto del camión sobre los pavimentos y los puentes.)

iii) Influencia del efecto dinámico de la circulación de los vehículos. Este efecto es también muy importante, por su acción tanto sobre los pavimentos como sobre las estructuras de los puentes. Sin embargo, la mayoría de los investigadores se ha ocupado principalmente del segundo efecto, lo que impide en esta oportunidad evaluar la acción sobre los pavimentos.

20/ Weights and Sizes, op. cit.

21/ Maximum Desirable Dimensions and Weights of Vehicles Operated on the Federal-Aid Systems, op.cit.

/No obstante,

No obstante, las limitaciones de la velocidad existentes en los países,^{22/} y también las correspondientes a la Decisión 94 (de 90, 70 y 50 km por hora en terrenos planos, ondulado y montañoso, respectivamente, como velocidades directrices de trazado), se ubican dentro de un tramo de velocidades que minimiza el efecto dinámico sobre el pavimento, según algunos investigadores.^{23/}

Se deduce, por lo tanto, que si bien el efecto dinámico de la velocidad del vehículo puede tener significación, las limitaciones que se imponen a ésta, probablemente lo restrinjan de forma que estaría implícito en las relaciones utilizadas en el presente estudio respecto de los desgastes del pavimento causados por determinadas solicitaciones (véase el cuadro 4).

iv) Armonización de las restricciones de peso por eje con los vehículos existentes en el parque automotor. Sin lugar a dudas éste es un aspecto principal del estudio pero no es posible incorporarlo rigurosamente por la significativa carencia de antecedentes al respecto. En la mayoría de los países existen informaciones sobre el parque automotor nacional, pero éstas no siempre resultan confiables o bien no están actualizadas o sólo corresponden a estimaciones. Por otra parte, cuando existen antecedentes más o menos confiables, éstos resultan insuficientes para el propósito de hacer compatibles las características del parque con las restricciones aquí planteadas. La explicación es que en ellos no se distingue el tipo de camión, sino únicamente - cuando se dan informaciones más detalladas - su capacidad, lo que obviamente impide identificar adecuadamente al vehículo (pues, por ejemplo, un grupo de vehículos cuya capacidad fluctúe entre 15 y 20 toneladas podría corresponder a camiones B, C, D o E o a combinaciones de ellos).

^{22/} En general, aprobadas más por razones de seguridad vial en relación con los diseños de las carreteras y para limitar las solicitaciones de los puentes, que para preservar los pavimentos.

^{23/} Estos mismos investigadores sostienen que el efecto dinámico de la velocidad del vehículo es una función parabólica, en la que los mayores desgastes ocurren con velocidades muy bajas y muy altas, mientras que el desgaste mínimo se sitúa en las velocidades medias.

/No obstante,

No obstante, sobre la base de observaciones de los escasos antecedentes que proporcionan las estadísticas sobre parques y, principalmente, de los estudios realizados en los países sobre peso por eje - para cuyo desarrollo se han realizado especialmente censos de tránsito que distinguen el tipo del camión -, se concluye que en la subregión prevalece el tipo de camión A, fluctuando su participación entre 60 y 80%, mientras que las participaciones de los camiones B, G y J, fluctúan entre 5 y 10% para cada uno de ellos, y los demás tipos están alrededor del 1 al 2%.

Este hecho muestra que los tipos de camiones adoptados en el estudio coinciden, en medida significativa, con los existentes en el parque automotor subregional.

/III. CONCLUSIONES

III. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones y recomendaciones que derivan de este estudio se presentan a continuación en forma resumida.

1. Restricciones de peso máximo admisible por eje

La conclusión principal a que llega la investigación realizada, es que el límite de peso máximo admisible que coadyuva a optimar la función del transporte automotor, se sitúa en la vecindad de 11 toneladas por eje simple y de 16 toneladas por eje doble, y su validez se extiende a la mayoría de los países andinos.

Así, resultan adecuadas las decisiones pertinentes adoptadas por Bolivia, Ecuador y Perú, como también lo aprobado en la Decisión 94 referente a normalización de diseños. Esto es especialmente válido en la medida que los tipos y valores medios adoptados en este estudio sean representativos de los pavimentos y camiones de esos países, y también de buena parte de aquellos en la subregión.

Sin embargo, si el transporte se realiza mediante camiones pesados y existe en un país (o área o región) una red vial de pavimentos más resistentes, la optimación del límite de peso máximo se desplaza hacia 13 toneladas por eje simple (y 21 toneladas por eje doble). Este parece ser el caso de Venezuela y Chile (cuyos límites son 13 y 12 toneladas por eje simple, respectivamente). El primero, porque dispone de pavimentos asfálticos de alto diseño y realiza por carretera casi la totalidad de su transporte interno y parte del correspondiente a su comercio exterior, para lo que usa camiones grandes y pesados. El segundo, porque también dispone de una infraestructura adecuada, que en el sur es en su mayor parte de hormigón, mientras que los pavimentos asfálticos del norte están muy favorecidos por condiciones climáticas y de suelos.

Es distinto el caso de Colombia, cuyo límite de peso máximo es de sólo 8.2 toneladas por eje simple. Al respecto, el presente informe no pretendió explicar o justificar aquel límite, sin embargo,

/parece deberse

parece deberse - según lo señalan diversos estudios - a que en este país las operaciones de conservación tienen una frecuencia muy espaciada en el tiempo. Si a ello se agrega que los pavimentos en general son de mediana resistencia, la explicación del bajo límite de peso por eje parece encontrarse en el deseo de preservar, lo mejor posible, el patrimonio vial existente. Este objetivo puede lograrse con aquel límite - sólo en la medida que pueda controlarse su estricto cumplimiento - pero a un costo económico significativamente alto.

2. La opción de repavimentar

Otra conclusión principal del estudio es que la repavimentación de las carreteras es una opción viable, pues resulta técnicamente factible y económicamente conveniente en diversas situaciones.

Esta posibilidad, estudiada y aplicada en Chile y Venezuela, contribuyó significativamente a que estos países se decidieran a fijar mayores límites de peso. Por otra parte, la repavimentación es imprescindible cuando se pretende disponer el aumento de los límites de peso máximo por eje y los pavimentos existentes tienen resistencias medianas o bajas. De no hacerlo, el costo total del transporte automotor aumentaría significativamente. Esta disposición permitiría disminuir los costos de operación en magnitud suficiente para compensar la inversión por realizarse, siempre que los volúmenes de carga que se vayan a transportar sean significativos. El presente estudio, en el análisis de un caso teórico de una carga anual de 1.4 millones de toneladas durante 15 años, concluye que el costo actualizado en la opción de repavimentar y aumentar el límite de peso máximo es inferior al de la opción de mantener el límite y no repavimentar, hasta una tasa de actualización del 18% anual.

3. Criterios sobre diseños de pavimentos

El propósito del estudio no fue evaluar diseños de pavimentos como objetivo principal, sino que ello constituyó una necesidad metodológica. Así, se obtuvieron algunas conclusiones parciales y tentativas al respecto.

/La más

La más interesante se refiere al tema, también controvertido, de la conveniencia relativa de los pavimentos rígido y flexible. En el estudio se llega a la conclusión que siempre que se disponga de estratigrafías de tránsito y de datos sobre las condiciones climáticas y de suelo, será posible diseñar un pavimento flexible y otro rígido que sean estructuralmente idénticos, o sea, que tengan capacidad suficiente para absorber las sollicitaciones previstas durante toda su vida útil de diseño. Por lo tanto, la opción de uno u otro depende de factores financieros y económicos propios de cada país, pues las inversiones necesarias en cada pavimento diferirán entre los países y entre las áreas en cada proyecto específico; los diversos países andinos son productores o importadores de asfalto o cemento; y, finalmente, ambos pavimentos tienen claras diferencias en cuanto a su capacidad de generar empleo en su conservación, pues las operaciones correspondientes a la capa asfáltica tienen mayor frecuencia y amplitud y podrían hacerse de forma menos mecanizada que en los pavimentos rígidos.

Otra conclusión interesante es que los espesores de pavimentos flexibles que parecen coadyuvar a minimizar el costo del transporte fluctúan entre 8 y 10 centímetros (en condiciones medias de clima y suelo) para volúmenes de tránsito de aproximadamente 9 millones de toneladas anuales transportadas en camiones de 25 a 30 toneladas de capacidad (o bien alrededor de 4.4 millones de toneladas anuales en camiones con capacidad aproximada de 10 toneladas). En demandas superiores a las referidas, el óptimo se eleva a 11 o 12 centímetros de espesor.

4. Criterios sobre tipos de camiones

Tampoco fue el propósito del estudio evaluar los tipos de camiones, pero también por necesidades metodológicas hubo de extraerse conclusiones al respecto.

La primera conclusión es que la equivalencia adoptada en los límites de peso máximo admisible se traduce en que el peso máximo del eje doble produce un deterioro menor que el peso máximo del

/eje simple,

eje simple, en todos los casos estudiados. (Ello por cuanto al eje tándem también se le restringe con el propósito adicional de evitar que cause significativas solicitaciones en las estructuras de los puentes.)

De lo anterior se desprende que el transporte realizado en camiones apoyados en ejes dobles tiene un costo entre 20 y 40% menor que en los camiones apoyados en ejes simples. Así, se concluye del estudio, que resultan más eficientes dos tipos de camiones: uno, con dos ejes, uno simple y el otro doble, de una pieza, y con capacidad de carga de 12 a 15 toneladas; y el otro, con tres ejes, uno simple y dos dobles, articulado, con capacidad de carga de 25 a 30 toneladas, apto para el transporte de contenedores.

Asimismo, cabe destacar que sólo las restricciones de peso por eje aplicadas en Venezuela y también de forma aproximada las vigentes en Chile, permiten el transporte de contenedores de 40 pies; la restricción de 11 toneladas por eje simple permite como máximo el contenedor de 30 pies; mientras que la restricción de 8.2 toneladas permite solamente el transporte de contenedores de 20 pies. Cabe insistir que la limitación del peso total de 38 toneladas por camión impide, en definitiva, el transporte del contenedor de 40 pies (salvo que - teóricamente - pudiera en el futuro disponerse de un camión de 38 toneladas de peso bruto, pero con una tara inferior a 8 toneladas).

5. Alcances al transporte automotor subregional

La principal conclusión sobre esta materia es que las restricciones de peso máximo por eje adoptadas por Ecuador, Perú y Bolivia, obviamente no limitan el transporte subregional entre ellos, y quizás también podría considerarse a Chile en este subgrupo, pues la discrepancia - de sólo una tonelada más - no debe introducir dificultades de significación.

Sin embargo, es muy distinta la situación para el transporte subregional que pasa por territorio colombiano, sea éste su origen, su destino, o bien esté en tránsito por él. Así, es notable la

/discrepancia de

discrepancia de este país con Venezuela, que se vinculan con volúmenes de tránsito significativos, pues los límites respectivos son de 8.2 y 13.0 toneladas por eje simple. Hasta ahora, la situación se ha obviado mediante el traspaso de carga en la frontera del camión extranjero a otro nacional. Evidentemente esta es una solución, pero encarece el costo.

6. El caso colombiano

Es muy importante tener presente que la restricción de peso por eje colombiana si bien repercute en el tránsito subregional, su incidencia principal recae en el transporte interno. Al respecto, basta un ejemplo extraído de esta investigación: el costo total (de infraestructura más operación) con un camión de 10 toneladas de capacidad en un pavimento asfáltico de 6 centímetros de espesor es de 3.02 centavos de dólar por tonelada-kilómetro, si rige la restricción de 8.2 toneladas por eje; el mismo costo, con una restricción de 11 toneladas por eje y en pavimento asfáltico de 10 centímetros de espesor, desciende a 0.89 centavos; mientras que si se tratara de un repavimento de 8 centímetros de espesor, descendería a 0.84 centavos.

Por otra parte, un eventual aumento en los límites de peso máximo por eje, haría viable, o a lo menos facilitaría, la labor de controlar el fiel cumplimiento de esta regulación más amplia, lo que en el caso de límites más bajos es difícil de aplicarse con rigurosidad. Así, las solicitudes totales sobre la red vial colombiana podrían disminuir respecto de las que probablemente prevalecen con los actuales límites.

7. Recomendaciones

A continuación se destacan solamente cinco recomendaciones que surgen del estudio.

i) Es claramente conveniente que Colombia realice un estudio sobre la factibilidad de repavimentar sus carreteras - probablemente sólo las principales -, y sobre esa base adopte un límite de peso

/por eje

por eje que contribuya a minimizar el costo total del transporte automotor interno y subregional. (Obviamente, también se debe estudiar la viabilidad de reforzar los puentes que tienen poca capacidad de absorción de cargas.) Para ello parece conveniente recurrir a fuentes de crédito subregionales; mientras que para la ejecución de las obras podría recurrirse a estas mismas fuentes u otras internacionales.

ii) Es muy conveniente que la JUNAC extienda también a los vehículos en circulación la aplicación del límite de 11 toneladas por eje aprobado para el diseño. Esto parece viable en la medida que se avance en lo referido en la sección anterior. También conviene reestudiar lo referente al peso máximo del camión conjuntamente con el límite del eje doble.

iii) Parece también favorable que los pavimentos de las carreteras troncales de Ecuador, Perú y Bolivia - cuya superficie de rodadura actual es de grava o tierra - sean diseñados de forma de optimar el costo total del transporte automotor, para lo cual puede ser útil la metodología desarrollada en este informe.

iv) Es también muy conveniente que los países andinos tiendan a uniformar sus restricciones, pues resultan notables las discrepancias que presentan, por un lado, sobre el eje simple, y por otro, que es más significativo aún, sobre el eje doble cuando ellas coinciden en el eje simple. A su vez esto redundaría, primero, en la uniformación de los límites de peso máximo de los camiones, y con ello, se facilitarían futuras eventuales modificaciones a la Decisión 94 en lo referente al límite de peso del eje doble y, consecuentemente, del peso bruto del camión. Con esta orientación es necesario que los países evalúen el efecto estructural de las solicitaciones de ejes dobles y peso bruto del camión en las estructuras de los puentes. Otro beneficio muy significativo que se desprendería de la uniformidad de restricciones de peso por eje en los países, es que se facilitaría no sólo la fabricación de

/camiones en

camiones en la subregión - pues disminuiría la variedad de tipos y modelos -, sino también la circulación de los camiones en el transporte subregional entre países en que este medio es adecuado, y el uso del autotrasbordo (roll-on/roll-off) en las vinculaciones entre países andinos relativamente distantes.

v) Finalmente, es muy conveniente que en los estudios de los parques automotores y del tránsito que se realizan en los países, se indiquen los tipos de los camiones, lo que aporta valiosos antecedentes a diversos estudios de planificación y diseño del transporte carretero.

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

... ..
... ..
... ..
... ..
... ..

ANEXO

Ejercicio 1

Si en un área dada las condiciones climáticas fueran, en promedio, 2 meses helados, 2 meses muy secos, 4 meses muy húmedos, y 4 meses de deshielo, el factor regional sería:

$$R = \frac{2 \times 0.5 + 2 \times 1.5 + 4 \times 3.5 + 4 \times 4.5}{2 + 2 + 4 + 4} = 3.0$$

Ejercicio 2

Supóngase una carretera dada cuyo pavimento admita - durante su vida útil con el índice de viabilidad asignado - un millón de pasadas de ejes equivalentes; que se disponga de camiones de un solo tipo cuya tara sea de 4 toneladas y su capacidad de 10 toneladas, que tenga dos ejes simples; que se pretenda transportar 8 millones de toneladas; y que las restricciones de peso máximo por eje sean optativamente de 8 y 10 toneladas por eje simple.

Opción de restricción de 8 toneladas por eje. En este caso el camión no podrá transportar en cada viaje más de 8 toneladas en total, las que sumadas a las 4 de peso muerto ejercerán una sollicitación total en el pavimento de 12 toneladas, que se distribuirán en 4 toneladas en el eje delantero y 8 en el trasero, con lo que cumplirá la restricción de peso máximo por eje. Este camión necesitará hacer un millón de viajes para transportar los 8 millones de toneladas. Cada pasada del camión cargado se traducirá en un efecto de: eje delantero, 0.05 ejes equivalentes; eje trasero, 0.95 ejes equivalentes; total, 1 eje equivalente por pasada de camión cargado. Suponiendo que sean despreciables los efectos del camión cuando pasa descargado, el millón de pasadas necesarias consumiría un millón de ejes equivalentes, con lo que consume la vida útil del pavimento.

Opción de restricción de 10 toneladas por eje. En este caso, el camión utilizará un factor de carga del 100%, pues el peso total se distribuirá, aproximadamente, 4.5 toneladas en el eje delantero y

/9.5 toneladas

9.5 toneladas en el trasero, límites que están por debajo de la restricción. Para transportar los 8 millones de toneladas deberá hacer 800 mil viajes (8 000 000/10). Los ejes equivalentes son: 0.09 en el eje delantero, y 1.26 en el trasero, con un total de 1.35 en cada pasada. Despreciando también el efecto de las pasadas del camión descargado las 800 mil pasadas consumen 1.08 millones de ejes equivalentes, que el pavimento adoptado no podría ofrecer.

Conclusión. Para el pavimento dado, la primera opción permite el transporte deseado, causando 1 millón de ejes equivalentes, mientras que la segunda, que ocasiona 1.08 millones de ejes equivalentes, no lo permite.

Ampliación del ejercicio. Del ejercicio planteado no se concluye que la primera restricción sea más favorable que la segunda, pues se han excluido los factores financieros. Suponiéndose en esta ampliación del ejercicio: una tasa de actualización igual a cero; costos de 100 000 unidades monetarias (UM) del pavimento; de 1 UM (para el viaje completo) el costo del camión con 8 toneladas de carga (0.125 UM por tonelada), y de 1.1 UM con 10 toneladas de carga (0.11 UM/tonelada). Se tiene entonces:

Costo de la opción I: a) Pavimento:	100 000 UM
b) Transporte 1 x 1 000 000	1 000 000 UM
<u>Total</u>	<u>1 100 000 UM</u>

Costo en la opción II:

a) Pavimento:	
i) 100% del primer pavimento:	100 000 UM
ii) 8% del repavimento:	8 000 UM
b) Transporte: 1.1 x 800 000	880 000 UM
<u>Total</u>	<u>988 000 UM</u>

De esta segunda parte del ejercicio se concluiría que es más conveniente la segunda restricción. Sin embargo, no ha sido la intención hacer tal demostración sino simplemente matizar la metodología.

/Ejercicio 3

Ejercicio 3

Supóngase una carretera no pavimentada en la que se han realizado estudios de tránsito que permitieron conocer el promedio diario de pasadas y el peso de cada uno de los ejes de los vehículos que pasaron. También se estimó la tasa de crecimiento de las pasadas (que resultó 5.0% anual acumulativo para todos los tipos de vehículos). Se pretende conocer el total de ejes equivalentes de la carretera para diseñar el pavimento con una vida útil de 20 años.

Para el cálculo, primero se agrupan los ejes de acuerdo con el peso que han registrado (columnas I y II del cuadro) y luego se los refiere a ejes equivalentes (de acuerdo con la equivalencia existente, columna III) los que se indican en la columna IV. El total de esta columna representa los ejes equivalentes de todo el tránsito diario, el que permite conocer el total anual mediante la simple aplicación del factor 365, valor que multiplicado por el factor de crecimiento acumulado (tasa de 5% anual durante 20 años) de 33.066, da los ejes equivalentes totales durante la vida útil de diseño.

I	II	III	IV = II x III
Peso de los ejes (tons/eje)	Número de ejes	Número de ejes equivalentes según el peso de cada eje	Número de ejes equivalentes según el peso total de los ejes
a) Ejes simples			
2	63	0.002	0.13
4	138	0.05	6.90
6	61	0.27	16.47
8	40	0.95	38.00
9	71	1.60	113.60
10	129	2.65	341.85
11	77	4.00	308.00
12	23	6.00	138.00
	<u>Subtotal</u>		<u>962.95</u>
b) Ejes dobles			
2	15	0.002	0.03
6	15	0.02	0.30
10	50	0.17	8.50
14	62	0.7	43.40
16	73	1.1	80.30
17	21	1.7	35.70
18	9	2.2	19.80
19	5	2.8	14.00
	<u>Subtotal</u>		<u>202.03</u>
<u>Total ejes equivalentes diarios:</u>			<u>1 164.98</u>
<u>Total ejes equivalentes en el primer año:</u>			<u>452 217.7</u>
<u>Total ejes equivalentes acumulados en 20 años:</u>			<u>14 952 400</u>

Ejercicio 4

Supóngase una situación dada, en que el factor regional sea 2.0, el soporte del suelo sea 6.7, y los ejes equivalentes totales durante la vida útil de diseño sean 6 millones. Se pretende determinar el número estructural.

La solución se inicia ubicando el factor regional en la correspondiente paralela al eje de las abscisas; sobre esta paralela se ubica el número de repeticiones totales de ejes equivalentes; a partir de este punto se traza una paralela al eje de las ordenadas hasta que intercepte la curva correspondiente al soporte del suelo; este punto se proyecta en paralelo al eje de las abscisas hasta el eje de las ordenadas, en el cual está representado el número estructural, que en el caso del ejemplo es 8.8 (véase de nuevo el gráfico 1). A continuación se anotan en el cuadro los diversos valores del número estructural obtenidos variando los parámetros.

Solicitud (millones de ejes equiva- lentes)	Factor regional (R)	Valor de soporte del suelo (S)	Número estructural resultante (NE)
6	2.0	6.7	8.8
6	3.0	6.7	9.5
6	2.0	3.0	14.1
6	3.0	3.0	15.0

Estos valores muestran claramente la incidencia de factores locales.

Ejercicio 5

Supóngase un número estructural (NE) igual a 7. Las siguientes tres opciones de espesor y materiales satisfacen igualmente esta condición estructural.

/Diseño I

Capas de rodadura	Diseño I				Diseño II				Diseño III			
	Material	a_i	Espe- sor (cm)	NE	Material	a_i	Espe- sor (cm)	NE	Material	a_i	Espe- sor (cm)	NE
Pavimento	Hormigón asfáltico	0.44	8	3.5	Hormigón asfáltico	0.44	6	2.6	Mezcla arena- asfalto	0.40	8	3.2
Base	Chancado	0.14	15	2.1	Grava-arena	0.11	24	2.6	Chancado	0.14	18	2.5
Sub-base	Arena	0.07	20	1.4	Arena	0.07	26	1.8	Arena	0.07	18	1.3
<u>Totales</u>				<u>7.0</u>				<u>7.0</u>				<u>7.0</u>

Los tres diseños son equivalentes en cuanto a sus condiciones estructurales, y los tres admiten las solicitaciones previstas para la vida útil del pavimento y de acuerdo con las condiciones climáticas y de suelo.

Ejercicio 6

Supóngase una base de 10 centímetros de espesor. Mediante la simple aplicación de la relación matemática, se concluye que $K_c = K + 0.5$, que para un soporte del suelo de 2.5 kg/cm^3 , por ejemplo, se llegaría a un soporte de diseño para el pavimento de $K_c = 3 \text{ kg/cm}^3$.

Ejercicio 7

Supóngase una carga de 10 toneladas producida por un eje simple en un suelo (o suelo más base) cuyo $K = 2 \text{ kg/cm}^3$. Se pretende conocer la tensión de flexotracción en pavimentos cuyos espesores optativos - previamente estimados con el propósito de tantear o aproximar - son 20, 17.5 y 15 centímetros, respectivamente. Para determinar la solución (véase de nuevo el gráfico 2), se ubica en la paralela a las abscisas correspondiente a $K = 2$, la carga de 10 toneladas, y desde este punto se traza la paralela al eje de las ordenadas, que intersecta las curvas correspondientes a los espesores referidos en tensiones de flexotracción de 21.5, 25.8 y 31.8 kg/cm^2 , respectivamente.

/Ejercicio 8

Ejercicio 8

En el ejercicio 7 se estudian tres opciones de pavimento, cuyos espesores son de 20, 17.5 y 15 centímetros, respectivamente, con un soporte $K = 2.0 \text{ kg/cm}^2$. Con esos datos se calcularon esfuerzos de 21.5, 25.8 y 31.8 kg/cm^2 . Se pretende determinar el número de repeticiones que admitirían los tres pavimentos de esos espesores, en el supuesto que el hormigón tenga una resistencia a los 90 días, de 45 kg/cm^2 y que las razones de fatigas sean de 0.48, 0.57 y 0.71 respectivamente. (Véase de nuevo la nota 12 de la Sección 1 b) del capítulo I.)

Los pavimentos admitirían repeticiones - del eje de 10 toneladas considerado en el ejemplo - que serían ilimitadas en el pavimento de 20 centímetros de espesor; 76 000 en el pavimento de 17.5 centímetros; y 1 700 en el pavimento de 15 centímetros. (Véase de nuevo el gráfico 4 y el cuadro 7.)

Ejercicio 9

El siguiente ejercicio explica el procedimiento de diseño de pavimentos rígidos, y a través del mismo, se desprende la incidencia de las diversas sollicitaciones.

Supóngase una carretera que se pretende pavimentar con hormigón para una vida útil de 20 años; el tránsito, que se presenta ordenado según grupos de pesos de ejes, se anota en la columna I del cuadro y ya está proyectado y acumulado para la vida útil de 20 años; la capacidad de soporte del suelo más la base es de 3.0 kg/cm^3 (véase el ejercicio 6); el hormigón que se usará tiene una resistencia de 45 kg/cm^2 ; y finalmente, se ha estimado adoptar - como precaución - un factor de seguridad del 20% sobre el peso de los ejes de los vehículos. La solución se presenta en los tres cuadros siguientes en los cuales se ha tanteado con espesores de 18, 20 y 19 centímetros, respectivamente.

Datos: $K = 2.5$; Factor de seguridad = 1.2.

Condiciones de diseño: espesor de la base: 10 (cm); $K_c = 3.0$;
resistencia del hormigón: 45 kg/cm^2 .

/Primer tanteo:

Primer tanteo: pavimento de 18 centímetros de espesor

I	II	III = I x 1.2	IV	V = IV/45	VI	VII = $\frac{II}{VI}$
Peso de los ejes (ton/eje)	Número total de repeticiones esperadas en la vida útil	Peso de los ejes considerando el factor de seguridad	Esfuerzo que produce cada peso por eje (kg/cm ²)	Razón de fatigas	Repeticiones	Fatiga consumida
a) Ejes simples						
2	61 003	2.4	a/	< 0.50	Ilimitadas	0.00
4	133 625	4.8	a/	< 0.50	"	0.00
6	59 066	7.2	a/	< 0.50	"	0.00
8	38 732	9.6	22	< 0.50	"	0.00
9	68 749	10.8	24.5	0.54	180 000	0.38
10	12 584	12.0	26.8	0.60	34 000	0.37
11	7 744	13.2	27.6	0.61	27 000	0.29
					<u>Subtotal</u>	<u>1.04</u>
b) Ejes dobles						
2	14 525	2.4	a/	< 0.50	Ilimitadas	
6	14 525	7.2	a/	< 0.50	"	
10	48 415	12.0	a/	< 0.50	"	
14	60 035	16.8	22.5	0.50	550 000	0.11
16	48 400	19.2	25.7	0.57	76 000	0.64
17	8 712	20.4	27.8	0.62	20 000	0.44
18	2 904	21.6	29.2	0.65	8 000	0.36
					<u>Subtotal</u>	<u>1.55</u>
					<u>Total</u>	<u>2.59</u>

a/ Despreciable.

Notas:

Los valores de la columna IV se obtuvieron de los gráficos 2 y 3, en los cuales se usaron los valores de la columna III, y K = 3.0.

Los valores de la columna VI se obtuvieron del gráfico 4, en el cual se usaron los valores de la columna V.

/Conclusión: El

Conclusión: El consumo de fatigas resulta superior a 1.0, por lo que el pavimento no admite las solicitaciones previstas durante la vida útil - para la que se está diseñando - por lo que debe tantearse otro pavimento.

Segundo tanteo: Como el soporte del suelo es invariable y se ha considerado el hormigón que, dentro de márgenes usuales tiene la mayor resistencia, puede tantearse aumentando el espesor del pavimento y - eventualmente también - el espesor de la base. Se adoptará un espesor para el pavimento de 20 centímetros, manteniendo $K_c = 3.0$.

Segundo tanteo: pavimento de 20 centímetros de espesor

II	III	IV	V	VI	VII
a) <u>Ejes simples</u>					
-	10.8	21.0	0.50	Ilimitadas	0.00
12 584	12.0	23.6	0.52	300 000	0.04
7 744	13.2	25.5	0.56	100 000	0.08
b) <u>Ejes dobles</u>					
48 400	19.2	23.1	0.51	400 000	0.12
8 712	20.4	24.0	0.53	240 000	0.04
2 904	21.6	25.6	0.53	76 000	0.04
<u>Total</u>					<u>0.32</u>

Nota: Sólo se indican las solicitaciones que lograron consumir fatigas en el pavimento de 18 centímetros. Asimismo se excluye la columna I pues resulta innecesaria en los tanteos sucesivos.

Conclusión: El pavimento de 20 centímetros está sobredimensionado, pues la fatiga consumida es muy inferior a 1.0.

/Tercer tanteo:

Tercer tanteo: pavimento de 19 centímetros de espesor

II	III	IV	V	VI	VII
a) <u>Ejes simples</u>					
68 749	10.8	23.0	0.51	400 000	0.17
12 584	12.0	25.2	0.56	100 000	0.13
7 744	13.2	26.6	0.59	43 000	0.18
b) <u>Ejes dobles</u>					
48 400	19.2	24.0	0.53	240 000	0.20
8 712	20.4	25.9	0.58	57 000	0.15
2 904	21.6	27.4	0.61	27 000	0.11
<u>Total</u>					<u>0.94</u>

Conclusión: Este diseño resultaría levemente sobredimensionado. Podría tantearse con un pavimento de 18.9 centímetros de espesor, o bien, aceptar este diseño (cuya vida útil, hipotéticamente, aumentaría 1.2 años).

Ejercicio 10

Supóngase una capa de rodadura asfáltica que ha cumplido su vida útil, cuyos espesores sean de 8 centímetros de asfalto, 15 centímetros de base de chancado, y 20 centímetros de sub-base de arena, y que se repavimentará con una capa de 8 centímetros de asfalto. Se desea conocer su número estructural.

Con apoyo en el cuadro 6 y siguiendo el mismo método del ejercicio 4, se tiene

<u>Capas</u>	<u>Material</u>	<u>a_i</u>	<u>Espesor</u> (cm)	<u>NE (parcial)</u>
Repavimento	Hormigón asfáltico	0.44	8	3.5
Pavimento inicial	Hormigón asfáltico gastado	0.26 <u>a/</u>	6 <u>b/</u>	1.6
Base	Chancado	0.14	15	2.1
Sub-base	Arena	0.07	20	1.4
<u>NE total</u>				<u>8.6</u>

a/ Se supone que su resistencia es de 60% de su valor inicial, por lo que a_i baja en esa proporción.

b/ Se supone una disminución del espesor inicial del 25%.

/Nota:

Nota: En los supuestos a/ y b/ está implícito que la conservación de la carretera ha sido insuficiente. En la práctica, y en estricto rigor, el espesor y el factor de ponderación a_i se determinan mediante estudios y ensayos de laboratorio. Por otra parte, algunos investigadores estiman que ambos criterios aplicados (en las notas a/ y b/) son muy conservadores.

Cabe destacar que el diseño calculado, que tiene un NE = 8.6, admite más del triple de los ejes equivalentes que corresponden al pavimento inicial (cuyo NE es 7, según el ejercicio 5), en los supuestos que el soporte del suelo $S = 6$ y que el factor regional $R = 3$.

Si se tratara de un repavimento de asfalto sobre hormigón de cemento cuyo espesor inicial era de 18 centímetros, con una base de 10 centímetros, se tendría:

Capa de rodadura y material	a_i	espesor (cm)	NE
Hormigón asfáltico	0.44	8	3.5
Base de hormigón de cemento	0.40 <u>a/</u>	13 <u>b/</u>	5.2
Sub-base granular	0.10	10	1.0
			<u>9.7</u>

a/ Se supuso una resistencia (para el hormigón desgastado) del 90% de la correspondiente al asfalto.

b/ Se supuso una disminución del espesor inicial del pavimento de 75%.

Nota: En opinión de algunos investigadores los criterios referidos en las notas a/ y b/ serían pesimistas.

Se obtiene así un número estructural significativamente alto.

2

2

